

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky

**Vyhodnocování kvalitativních a
kvantitativních vlastností LED svítidel**

**Evaluation of the qualitative and
quantitative properties of LED luminaires**

Zadání diplomové práce

Student:

Bc. Miroslav Všetula

Studijní program:

N2649 Elektrotechnika

Studijní obor:

3907T001 Elektroenergetika

Téma:

Vyhodnocování kvalitativních a kvantitativních vlastností LED svítidel
Evaluation of the qualitative and quantitative properties of LED
luminaires

Jazyk vypracování:

čeština

Zásady pro vypracování:

1. Princip funkce LED.
2. Barevné vlastnosti LED.
3. LED svítidla.
4. Důvody řízení osvětlovacích soustav.
5. Možnosti řízení LED svítidel.
6. Návrh a měření řídicích křivek LED svítidla.

Seznam doporučené odborné literatury:


- [1] Sokanský, K.: Světelná technika. ČVUT, Praha, 2011
- [2] Habel, J.: Světlo a osvětlování. FCC Public, Praha 2013
- [3] Boyce, P. R.: Human Factors in Lighting, Third Edition, CRC Press. ISBN 978-1-4398-7488-2.
- [4] Sborníky z Kurzů osvětlovací techniky, Sborníky VŠB-TU
- [5] Manuály k výpočetním programům (Relux, Dialux, WILS)
- [6] www.csorsostrava.cz [1]

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Roman Hrbáč, Ph.D.**

Datum zadání: 01.09.2017

Datum odevzdání: 30.04.2018


prof. Ing. Stanislav Rusek, CSc.
vedoucí katedry





prof. Ing. Pavel Brandštetter, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

„Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.“

V Ostravě, dne: 28. dubna 2018

Podpis: 

Poděkování

Rád bych chtěl touto cestou poděkovat svému vedoucímu diplomové práce, panu Ing. Romanu Hrbáčovi, Ph.D., za odbornou pomoc a cenné rady při zpracování této diplomové práce.

Mé poděkování patří také rodině a blízkým přátelům za pomoc a podporu během studia.

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá možností využití LED svítidel schopných měnit svou náhradní teplotu chromatičnosti. Cílem teoretické části práce je uvést čtenáře do problematiky LED svítidel a jejich řízení. Praktická část diplomové práce se zabývá měřením elektrických a světelných parametrů LED svítidla a jeho řídicího obvodu, s následným rozбором popisujícím konstrukci řídicích křivek, které umožňují měnit nezávisle na sobě intenzitu osvětlení a náhradní teplotu chromatičnosti.

Klíčová slova

LED, řízení, řídicí křivky, náhradní teplota chromatičnosti, index podání barev, intenzita osvětlení, cirkadiánní rytmy.

Abstract

This diploma thesis deals with the possibility of using LED luminaires capable of changing their correlated chromaticity temperature. The objective of the theoretical part of this thesis is to introduce the reader to the issue of LED luminaires and their driving. The practical part of the diploma thesis deals with the measurements of electrical and light parameters of the LED luminaire and its driving circuit with subsequent analysis describing construction of driving curves, which allow for the independent change of the illuminance and the correlated color temperature.

Key words

LED, driving, driving curve, correlated color temperature, color rendering index, illuminance, circadian rhythms.

Obsah

Úvod.....	1
1. Princip činnosti elektroluminiscenční diody	2
1.1 Princip funkce.....	2
1.2 V-A charakteristika LED	3
1.3 Rekombinace.....	3
1.3.1 Mezipásmová rekombinace.....	4
1.3.2 Rekombinace přes lokální centra (Shockley-Read-Hall)	4
1.3.3 Povrchová rekombinace	4
2. Energetická bilance LED svítidla	5
2.1 Měrný výkon čipů.....	6
2.2 Měrný výkon svítidel.....	7
3. Barevné vlastnosti LED	8
3.1 Typy LED.....	9
3.1.1 RGB.....	9
3.1.2 LED s luminoforem.....	9
3.2 Míchání teplé a studené barvy světla.....	10
3.2.1 Stmívání do teplé (Dim-To-Warm).....	10
3.2.2 Nastavitelná bílá (Tunable-White)	11
3.2.3 Plnobarevně nastavitelné (Full-Color-Tunable)	12
4. Kvalitativní a kvantitativní parametry	13
4.1 Kvalitativní parametry	13
4.1.1 Životnost.....	13
4.1.2 Vyzařovací úhel.....	13
4.1.3 Všeobecný index podání barev.....	14
4.1.4 Náhradní teplota chromatičnosti	14
4.2 Kvantitativní parametry	17
4.2.1 Světelný tok.....	17
4.2.2 Příkon	17
4.2.3 Měrný výkon	17
5. LED svítidla	18
5.1 Požadavky	18
5.2 Napájení	18
5.2.1 Zdroj konstantního proudu	19
5.2.2 Zdroj konstantního napětí.....	19
5.3 Odvod tepla.....	19

5.3.1	Chladič	21
5.4	Optika.....	21
5.5	Možnosti omezení oslnění	22
6.	Důvody řízení osvětlovacích soustav.....	24
6.1	Fyziologické důvody.....	24
6.1.1	Dopad osvětlení na lidský organismus.....	25
6.2	Ekonomické a ekologické důvody	26
7.	Možnosti řízení LED svítidel	28
7.1	Metoda řízení PWM.....	28
7.1.1	PWM stmívání LED diod.....	28
7.2	Metoda řízení CCR	29
7.2.1	Lineární řídicí obvody	29
7.2.2	Spínané řídicí obvody.....	30
7.3	Rozdíly mezi jednotlivými metodami řízení.....	31
8.	Experimentální měření účinnosti LED driveru.....	33
8.1	Napájecí zdroj.....	33
8.2	Řídicí obvod	33
8.3	Naměřené křivky účinností.....	35
8.4	Naměřené průběhy vstupních veličin pro analogové a PWM řízení	39
9.	Experimentální měření parametrů svítidla při různých spínacích frekvencích	42
9.1	Měřené svítidlo	42
9.2	Naměřené charakteristiky	43
9.3	Dodatečné měření na fotometrické lavici.....	48
10.	Návrh a měření řídicích křivek LED svítidla	49
10.1	Měření řídicích křivek	49
10.2	Návrh řídicích křivek.....	49
10.2.1	Řídicí křivky pro změnu intenzity osvětlení při zachování konstantní náhradní teploty chromatičnosti.....	50
10.2.2	Řídicí křivky pro změnu náhradní teploty chromatičnosti při zachování konstantní intenzity osvětlení.	53
10.2.3	Řídicí křivky pro nezávislou regulaci náhradní teploty chromatičnosti a intenzity osvětlení, vykreslené pomocí společných bodů průniku.....	55
	Závěr	58
	Seznam literatury	60

Seznam některých použitých symbolů a zkratek

Veličina	Symbol	Jednotka
Střídavý proud (Alternating Current)	AC	
Báze (Base)	B	
Rychlost světla	c	m/s
Kolektor (Collector)	C	
Redukování konstantního proudu (Constant current reduction)	CCR	
Mezinárodní komise pro osvětlování	CIE	
Digitálně analogový převodník	D/A	
Digitálně adresované komunikační rozhraní pro osvětlení	DALI	
Stejnoseměrný proud (Direct Current)	DC	
Povelový protokol pro digitální přenos řídicích informací	DMX	
Deska plošných spojů	DPS	
Náboj elektronu	e	C
Emitter (Emitter)	E	
Elektromagnetické rušení (Electromagnetic Interference)	EMI	
Ekvivalentní sériový odpor (Equivalent Series Resistance)	ESR	
Intenzita osvětlení	E_v	lx
Frekvence	f	Hz
Frekvence pulzní šířkové modulace	f_{pwm}	Hz
Planckova konstanta	h	J.s
Svítivost	I	cd
Okamžitá hodnota proudu	i	A
Elektrický proud	I	A
Elektrický proud v propustném směru	I_F	A
Elektrický proud tekoucí LED diodou	I_{LED}	A
Maximální hodnota proudu	I_{max}	A
Elektrický proud v závěrném směru	I_R	A
Infračervené (Infrared)	IR	
Měrný výkon	K	lm/W
Jas	L	cd/m ²
Světlo emitující dioda (Light Emitting Diode)	LED	
Materiál teplotního rozhraní	MTR	
Počet LED čipů	n	-

Příkon	P	W
Kompenzace účinníku (Power Factor Correction)	PFC	
Zářivý tok vyzařený ze svítidla	P_{out}	W
Tepelná energie	P_t	W
Pulzní šířková modulace (Pulse Width Modulation)	PWM	
Tepelný odpor mezi jednotlivými rozhraními	R	°C/W
Index podání barev (Color Rendering Index)	R_a , CRI	-
Červená, zelená, modrá (Red, Green, Blue)	RGB	
Elektrický odpor LED diody	R_{LED}	Ω
Odpor snímacího rezistoru	R_{sense}	Ω
Velikost svítící plochy	S	m ²
Čas	t	s
Teplota rozhraní	T	°C
Tranzistor	$T_{1;2}$	
Náhradní teplota chromatičnosti	T_c	K
Celkový vnitřní odraz (Total Internal Reflection)	TIR	
Provozní teplota	T_p	°C
Okamžitá hodnota napětí	u	A
Hardwarový blok určený pro sériovou komunikaci	UART	
Elektrické napětí mezi bázi a emitorem	U_{BE}	V
Průrazné elektrické napětí	U_{BR}	V
Elektrické napětí mezi kolektorem a emitorem	U_{CE}	V
Stejnoseměrné napětí D/A převodníku	U_{DA}	V
Elektrické napětí v propustném směru	U_F	V
Prahové elektrické napětí	U_p	V
Elektrické napětí v závěrném směru	U_R	V
Úbytek napětí na odporu	U_R	V
Jmenovitá hodnota napětí	U_S	V
Elektrické napětí na snímacím rezistoru	U_{sense}	V
Volt-Ampérová	V-A	
"Hlídací pes" (Watchdog Timer) resetuje systém při zacyklení	WDT	
Účinnost	η	%
Křivka spektrální citlivosti oka	V_λ	nm
Vlnová délka	λ	nm
Světelný tok	Φ	lm

Seznam ilustrací

Obr. 1 Složení běžné LED [3].....	2
Obr. 2 VA charakteristika LED diody [4].....	3
Obr. 3 Rekombinace na P-N přechodu [5].....	4
Obr. 4 Blokové schéma zapojení LED svítidla.....	5
Obr. 5 Předpokládané zvýšení měrného výkonu LED (CM – RGB, PC – LED s luminoforem) [9].....	6
Obr. 6 Spektrální rozložení zářivého výkonu LED pro různé teploty chromatičnosti s křivkou V_λ [10].....	7
Obr. 7 Běžná RGB dioda [14].....	9
Obr. 8 Míchání RGB [13].....	9
Obr. 9 Složení LED s luminoforem [15].....	10
Obr. 10 Vyzařovací charakteristika LED žárovky s vyznačeným vyzařovacím úhlem [19].....	14
Obr. 11 Spektrum teploty barvy světla [20].....	15
Obr. 12 Trichromatický trojúhelník s křivkou teplotních zářičů [8].....	15
Obr. 13 Trichromatický trojúhelník s MacAdamovými elipsami [8].....	15
Obr. 14 Křivka teplotních zářičů s MacAdamovými elipsami [8].....	16
Obr. 15 Relativní spektrální citlivost oka [24].....	17
Obr. 16 Změna velikosti proudu při změně napětí na LED diodě [26].....	18
Obr. 17 Blokové schéma typického LED předřadníku [30].....	18
Obr. 18 Závislost životnosti LED na teplotě P-N přechodu [28].....	19
Obr. 19 Tepelný obvod klasické LED [29].....	20
Obr. 20 Rozdíl v distribuci světelných paprsků u TIR a Reflektoru [31].....	22
Obr. 21 Vyobrazení úhlu $\cos(\theta)$	23
Obr. 22 Směrování unikajícího světla za pomoci zapuštění svítidla [32].....	23
Obr. 23 Stropní svítidlo bez difuzoru a s difuzorem [33].....	23
Obr. 24 Vykreslení závislosti lidského výkonu na osvětlení [34].....	24
Obr. 25 Procentní podíl pracovníků pracujících při různé intenzitě osvětlení [34].....	27
Obr. 26 Princip generování PWM [38].....	28
Obr. 27 Modulovaný PWM signál [39].....	28
Obr. 28 Základní schéma zapojení PWM stmívání [38].....	28
Obr. 29 Znázornění střední hodnoty napětí v závislosti na hodnotě střidy [40].....	29
Obr. 30 Zdroj konstantního proudu zapojením dvou tranzistorů [41].....	29
Obr. 31 Obvodové schéma spínaného zdroje typu Buck.....	30
Obr. 32 Průběh proudu na induktoru.....	30
Obr. 33 Porovnání linearitě stmívání bílých LED pro PWM a CCR metodu [42].....	31
Obr. 34 Porovnání měrné účinnosti v závislosti na stmívání pro CCR a PWM metodu [42].....	31
Obr. 35 Porovnání změny teploty chromatičnosti v závislosti na stmívání pro CCR a PWM metodu [42].....	32
Obr. 36 Napájecí zdroj IRM-45-48ST [43].....	33
Obr. 37 Řídicí obvod osazený čipem ILD6150 [44].....	33
Obr. 38 Zjednodušené blokové schéma zapojení řešeného LED driveru.....	34

Obr. 39 Charakteristiky účinnosti IRM-45-48ST, napájené LED mají $T_c = 2\,700\text{ K}$ a $U_f = 3,16\text{ V}$	35
Obr. 40 Charakteristiky účinnosti IRM-45-48ST, napájené LED mají $T_c = 5\,000\text{ K}$ a $U_f = 3,16\text{ V}$	35
Obr. 41 Charakteristiky účinnosti ILD6150, napájené LED mají $T_c = 2\,700\text{ K}$ a $U_f = 3,16\text{ V}$..	36
Obr. 42 Charakteristiky účinnosti ILD6150, napájené LED mají $T_c = 5\,000\text{ K}$ a $U_f = 3,16\text{ V}$..	36
Obr. 43 Charakteristiky celkové účinnosti, napájené LED mají $T_c = 2\,700\text{ K}$ a $U_f = 3,16\text{ V}$	37
Obr. 44 Charakteristiky celkové účinnosti, napájené LED mají $T_c = 5\,000\text{ K}$ a $U_f = 3,16\text{ V}$	37
Obr. 45 Charakteristiky celkové účinnosti v závislosti na odebíraném výkonu, LED mají $T_c = 2\,700\text{ K}$	38
Obr. 46 Charakteristiky celkové účinnosti v závislosti na odebíraném výkonu, LED mají $T_c = 5\,000\text{ K}$	38
Obr. 47 Analogové řízení: $f_{\text{PWM}} = 1,6\text{ kHz}$, $U_{\text{DA}} = 1,6\text{ V}$, $P = 7,77\text{ W}$	39
Obr. 48 PWM řízení: $f_{\text{PWM}} = 200\text{ Hz}$, $\text{střída} = 50\%$, $P = 7,60\text{ W}$	39
Obr. 49 PWM řízení: $f_{\text{PWM}} = 1,5\text{ kHz}$, $\text{střída} = 55\%$, $P = 7,80\text{ W}$	40
Obr. 50 PWM řízení: $f_{\text{PWM}} = 5\text{ kHz}$, $\text{střída} = 55\%$, $P = 7,72\text{ W}$	40
Obr. 51 PWM řízení: $f_{\text{PWM}} = 10\text{ kHz}$, $\text{střída} = 55\%$, $P = 7,63\text{ W}$	41
Obr. 52 PWM řízení: $f_{\text{PWM}} = 20\text{ kHz}$, $\text{střída} = 60\%$, $P = 7,75\text{ W}$	41
Obr. 53 Umístění LED diod na tištěném spoji opatřeném kovovou chladicí plochou	42
Obr. 54 Vykreslení závislosti R_a indexu na velikosti střidy pro teplou LED	43
Obr. 55 Vykreslení závislosti R_a indexu na velikosti střidy pro studenou LED	43
Obr. 56 Vykreslení závislosti náhradní teploty chromatičnosti na velikosti střidy pro teplou LED	44
Obr. 57 Vykreslení závislosti náhradní teploty chromatičnosti na velikosti střidy pro studenou LED	44
Obr. 58 Vykreslení závislosti procentuální intenzity osvětlení na velikosti střidy pro teplou LED	45
Obr. 59 Vykreslení závislosti procentuální intenzity osvětlení na velikosti střidy pro studenou LED	45
Obr. 60 Vykreslení závislosti příkonu na velikosti střidy pro teplou LED	46
Obr. 61 Vykreslení závislosti příkonu na velikosti střidy pro studenou LED	46
Obr. 62 Vykreslení závislosti procentuální intenzity osvětlení na příkonu pro teplou LED	47
Obr. 63 Vykreslení závislosti procentuální intenzity osvětlení na příkonu pro studenou LED ..	47
Obr. 64 Ilustrační obrázek vyobrazující dráhu fotonů procházejících luminoforem	48
Obr. 65 Řídicí křivky pro konstantní náhradní teplotu chromatičnosti vykreslené z naměřených hodnot	51
Obr. 66 Linearizované křivky pro konstantní náhradní teplotu chromatičnosti vykreslené pomocí rovnic lineární regrese	52
Obr. 67 Řídicí křivky pro konstantní intenzitu osvětlení vykreslené z naměřených hodnot	53
Obr. 68 Linearizované křivky pro konstantní intenzitu osvětlení vykreslené pomocí rovnic lineární regrese	54
Obr. 69 Zkombinované linearizované řídicí křivky	54
Obr. 70 Řídicí křivky pro konstantní náhradní teplotu chromatičnosti vykreslené pomocí bodů průsečíku	55

Obr. 71 Řídicí křivky pro konstantní intenzitu osvětlení vykreslené pomocí bodů průsečíku ...	56
Obr. 72 Finální graf řídicích křivek pro nezávislou regulaci náhradní teploty chromatičnosti a intenzity osvětlení	56

Seznam tabulek

Tab. 1 Srovnání energetické bilance různých druhů světelných zdrojů [7]	5
Tab. 2 Typické parametry různých druhů P-N přechodů [1]	8
Tab. 3 Příklad fotometrického kódu [8]	16
Tab. 4 Průměrná procentní hodnota úspory energie při použití různých systémů řízení osvětlení [34]	27
Tab. 5 Tabulka parametrů použitých LED [45]	42
Tab. 6 Naměřené hodnoty náhradní teploty chromatičnosti při různých úhlech natočení	48
Tab. 7 Příklad rozvržení naměřených hodnot náhradní teploty chromatičnosti s příslušnými hodnotami střídy	49
Tab. 8 Příklad rozvržení tabulky s přiřazenými hodnotami odpovídajícími zvolené teplotě chromatičnosti	51
Tab. 9 Příklad rozvržení tabulky s výslednými hodnotami upravenými pro zpracování mikroprocesorem	57

Úvod

LED neboli Light Emitting Diode je speciální typ diody, který má velmi podobné elektrické parametry jako P-N dioda, to znamená, že LED dioda přenesení tok proudů jedním směrem, ale blokuje jej směrem opačným. Světlo emitující diody jsou tvořeny velmi tenkou vrstvou silně dotovaného polovodičového materiálu, dle druhu použitého materiálu a velikosti dotování můžeme vyrobit LED emitující na specifické spektrální vlnové délce.

Světelné diody prošly v poslední době velmi rychlým vývojem, během kterého se rapidně zvyšoval jejich měrný výkon, a zdokonalovaly se jejich světelné parametry. Díky tomuto rychlému vývoji a novým možnostem, které dnešní LED diody nabízí, se začala intenzivněji řešit otázka regulace vnitřního osvětlení. Oproti konvenčním světelným zdrojům je přínos LED diod v oblasti regulace osvětlení eminentní, neboť v dnešní době není možno regulovat konvenční světelné zdroje v takovém rozsahu, v jakém je možno regulovat LED diody. Poslední dobou se začíná intenzivněji řešit otázka dynamiky umělého osvětlení. Člověk se po celou dobu své existence vyvíjel a adaptoval pro život v prostředí s dynamickým denním osvětlením, které poskytovalo především slunce. K výrazné změně došlo během posledního století, kdy člověk dokázal proměnit energii elektrickou na energii světelnou a využít ji k vytvoření umělého osvětlení. Díky umělému osvětlení se u lidí začal měnit také jejich životní styl, díky kterému jsou během nočních hodin aktivnější, než kdy dříve. Až v poslední době se začíná řešit, jaké důsledky má pro člověka nepřirozené umělé osvětlení. Zjistilo se, že lidský organismus má v sobě zabudovány biologické hodiny, které se synchronizují zejména pomocí denní doby, neboli pomocí světelných podmínek, ve kterých se člověk nachází. Jedním z významných objevů v oblasti účinků umělého světla, byl objev negativních účinků modré složky světelného spektra na lidský organismus. LED diody používané k osvětlení mají ve svém spektru bohužel tuto modrou složku obsaženu. Dnes je již však možno vyrobit LED diody s teplou bílou barvou světla, které mají modrou složku ve svém světelném spektru výrazně nižší. Otevírá se tak cesta k novému druhu regulace, kterou poskytují pouze LED diody, regulace náhradní teploty chromatičnosti osvětlení. Díky tomu, že nám LED diody umožňují pomocí stmívání měnit intenzitu osvětlení a pomocí míchání teplé a studené barvy světla měnit náhradní teplotu chromatičnosti, tak jsme schopni navrhnout osvětlovací soustavu, která dokáže měnit své světelné parametry dynamicky a přiblížit tak vlastnosti umělého osvětlení přirozenému dennímu světlu, na které se lidský organismus evolučně adaptoval.

Teoretická část diplomové práce má za cíl uvést čtenáře do problematiky LED svítidel a jejich řízení, kdy první kapitola čtenáři poskytne informace týkající se principu činnosti LED diod, následně je čtenář uveden do problematiky energetické bilance LED diod, principu tvorby barvy světla, dále je seznámen s kvalitativními a kvantitativními vlastnostmi LED svítidel, dozví se také o konstrukčních vlastnostech LED svítidel. Dále jsou v práci podrobněji rozebrány důvody pro řízení LED svítidel a možnosti, jakými jsme schopni tato svítidla řídit.

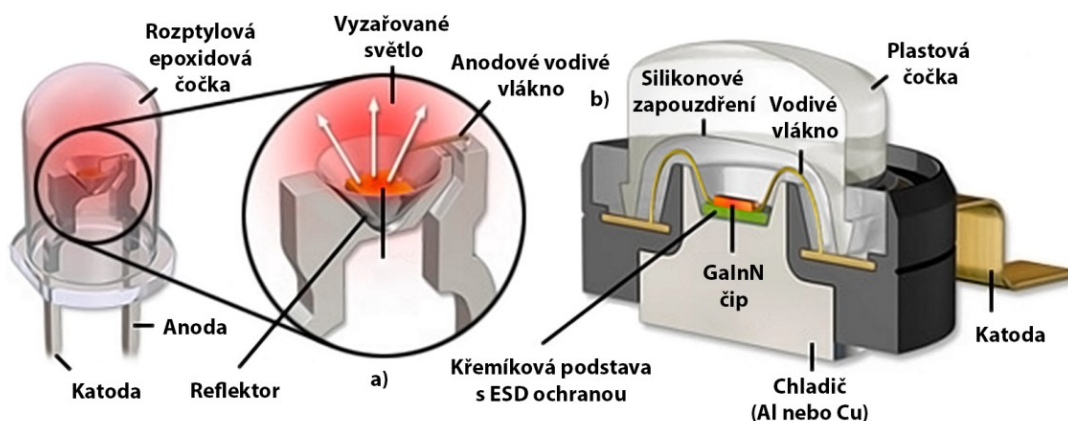
Praktická část práce navazuje na teoretickou část experimentálním měřením parametrů LED svítidla, ve kterém se čtenář dozví o chování LED diod při jejich řízení a následně je rozebráno měření a návrh řídicích charakteristik, potřebných pro nezávislou regulaci náhradní teploty chromatičnosti a intenzity osvětlení LED svítidla.

1. Princip činnosti elektroluminiscenční diody

1.1 Princip funkce

LED vytváří světlo díky technologii zvané PN přechod. V polovodiči typu N je přebytek elektronů, zatímco v polovodiči typu P je elektronů nedostatek a vzniká tak přebytek kladných "děr". Spojením těchto polovodičů dochází na jejich rozhraní k rekombinaci záporných elektronů s kladnými děrami a vytvoří se úzká oblast, nazývaná se depletiční oblast. Jedná se o úzké nevodivé pásmo, ve kterém již k samovolné rekombinaci nedochází. PN přechod je vyráběn z různých materiálů, jako například GaAsP (galiumarsenfosfid), GaAs (galiumarsenid), GaP (Galiumfosfid) a GaN (galiumnitrid). [1]

PN přechod lze zapojit v propustném nebo závěrném směru. Pro připojení do propustného směru je třeba připojit kladný pól zdroje k polovodiči typu P (anoda) a záporný pól k polovodiči typu N (katoda). Prochází-li PN přechodem v propustném směru elektrický proud, tak dochází k rekombinaci „děr“ s elektrony na valenční sféře atomů. Volné elektrony se nacházejí ve vodivostním pásmu, zatímco „díry“ se nacházejí ve valenčním pásmu, tím pádem energetická hladina děr je nižší, než energetická hladina elektronu a tak část energie musí být při rekombinaci vypuštěna. Při vypuštění energie ve formě fotonů s vlnovou délkou ve viditelném spektru, mluvíme o světelném přechodu. Jelikož jsou fotony vyzařovány do různých směrů, je nutné, aby struktura LED umožnila vyzáření fotonu tak, aby nebyl pohlcen materiálem polovodiče, z toho důvodu musí být polovodič typu P co možná nejužší. LED vytvářejí fotony, které emitují světlo na jedné vlnové délce tzv. monochromatické světlo. Můžeme tedy říci, že LED diody přeměňují energii elektrickou na energii světelnou. [2]



Obr. 1 Složení běžné LED [3]

Popis obrázku:

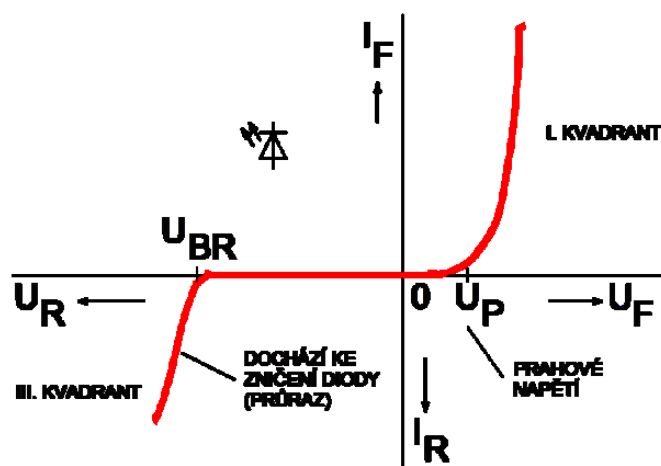
Kladný náboj je přiváděn vodičem přes anodu LED diody do vodivého vlákna. Druhá část diody je zapojena k vodivému rámu vedoucímu z katody k zápornému pólu. O barvě vyzařovaného světla rozhoduje chemické složení LED polovodiče. Epoxidová pryskyřice, ve které se celá LED nachází má tři hlavní funkce. Za prvé je navržena tak, aby dovolila průchod maximálnímu množství světla, dále upravuje úhel, pod kterým se světlo šíří a chrání LED před vlivy okolí. [2]

1.2 V-A charakteristika LED

V-A charakteristika, neboli závislost stejnosměrného proudu procházejícího diodou na připojeném stejnosměrném napětí udává chování LED v elektrickém obvodu.

V propustném směru se na charakteristice pohybujeme v prvním kvadrantu, kde prahové napětí U_P je napětí, při kterém diodou začíná procházet proud a udává konstantní úbytek napětí na diodě, při překonání prahového napětí diody se zruší nevodivé pásmo na PN přechodu a odpor diody je poté v propustném směru velmi malý. Velikost prahového napětí je dána složením PN přechodu. Pracovní oblast LED se nachází za kolenem křivky V-A charakteristiky v propustném směru a z důvodu strmosti charakteristiky je patrné, že LED je třeba napájet zdrojem konstantního proudu, aby nedošlo k její destrukci.

V závěrném směru se na charakteristice pohybujeme ve třetím kvadrantu a diodou prochází velmi malý proud, neboť přiložené napětí zvýší velikost nevodivého pásma na PN přechodu a odpor se zvýší na stovky kiloohmů až desítky megaohmů. Dosáhne-li však závěrné napětí U_R velikosti napětí U_{BR} , dochází k průrazu diody a dojde k prudkému nárůstu závěrného proudu, intenzita elektrického pole pak dosahuje intenzity dostatečné na vytrhnutí elektronů z vazeb mezi atomy a dochází k celkové ionizaci krystalové mřížky, následkem je poté destrukce LED diody. [4]



Obr. 2 VA charakteristika LED diody [4]

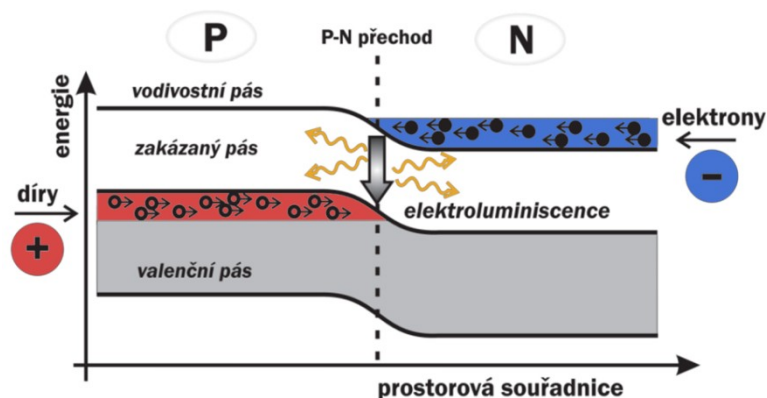
1.3 Rekombinace

Jak bylo dříve zmíněno, na PN přechodu existují dva druhy nosičů elektrického náboje, díra a elektron.

Každý elektron, který se nachází ve vodivostním pásmu atomu, je v meta-stabilním stavu a nakonec se stabilizuje na nižší energetickou hladinu ve valenčním pásmu, když k tomu dojde, musí se elektron přesunout do prázdného „místa“ ve valenčním pásmu a tím pádem odstraní „díru“.

Existují tři typy rekombinace:

- Mezipásmová
- Přes lokální centra
- Povrchová



Obr. 3 Rekombinace na P-N přechodu [5]

1.3.1 Mezipásmová rekombinace

K mezipásmové rekombinaci dochází při přechodu volného elektronu z vodivostního pásu do valenčního pásu, jehož výsledkem je zánik volného elektronu a díry. Podle toho jakým způsobem se odevzdá energie, se mezipásmová rekombinace rozděluje na tři typy.

Pokud se energie uvolněná rekombinací vyzáří ve formě světelného kvanta, jehož energie je rovna šířce zakázaného pásma, mluvíme o **zářivé rekombinaci**.

Pokud uvolněná energie není vyzářena ve formě fotonu, ale je předána jako kinetická energie sousednímu elektronu, mluvíme o **nezářivé rekombinaci**.

Pokud se rekombinace zúčastňují tři nosiče, tak dva z nich mohou rekombinovat a současně odevzdat energii třetímu volnému elektronu nebo díře a ten poté přejde na vyšší energetickou hladinu v pásu, mluvíme poté o **nárazové rekombinaci (nebo také Augerova)**. [6]

1.3.2 Rekombinace přes lokální centra (Shockley-Read-Hall)

Při nízké koncentraci příměsí je velice nepravděpodobné, aby došlo k mezipásmové rekombinaci. V takovýchto případech dochází k rekombinaci prostřednictvím rekombinačních center. Jsou to různé druhy příměsí nebo poruch v krystalové mřížce, které vytvářejí energetické hladiny v zakázaném pásmu. Tyto hladiny slouží jako mezistupně pro přechod elektronů a děr mezi valenčním a vodivostním pásem.

Tato pásma mohou zachytit elektron z vodivostního pásu, který po určitém čase přejde do valenčního pásu a také tato rekombinace může být zářivá, nezářivá nebo nárazová. [6]

1.3.3 Povrchová rekombinace

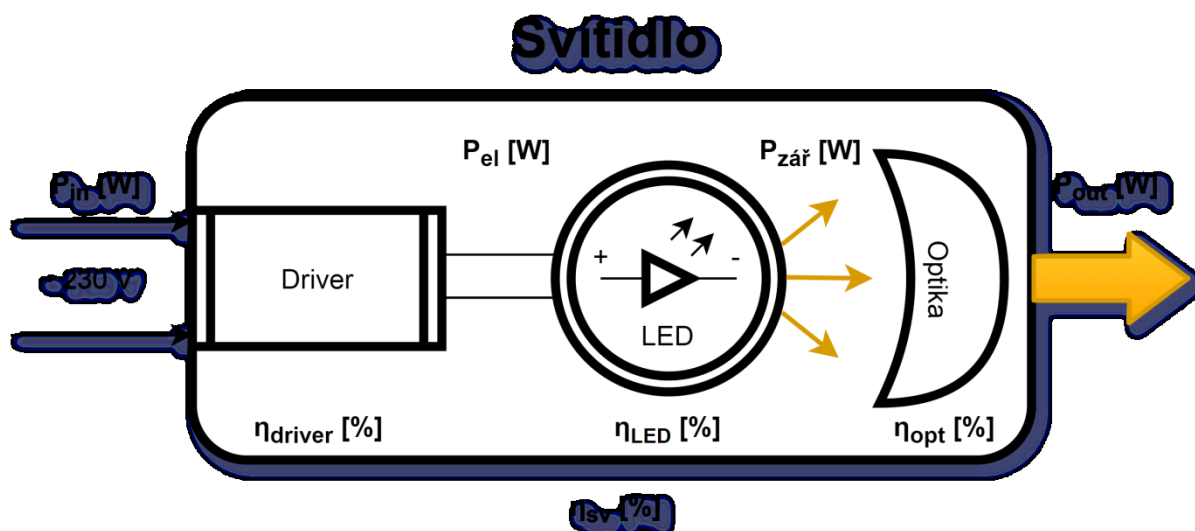
Rekombinace nosičů náboje na povrchu polovodiče se nazývá povrchová a realizuje se přes lokální povrchové hladiny (podobně jako rekombinace přes lokální centra).

2. Energetická bilance LED svítidla

Tab. 1 Srovnání energetické bilance různých druhů světelných zdrojů [7]

Světelný zdroj	Bílé LED	Zářivka	HMI výbojka	60 W žárovka
Viditelné záření	40-50 %	21 %	27 %	8 %
Infračervené záření	~0 %	37 %	17 %	73 %
Ultrafialové záření	0 %	~0 %	19 %	0 %
Celková vyzářená energie	40-50 %	58 %	63 %	81 %
Zbývající energie – teplo	50-60 %	42 %	37 %	19 %

Energetická bilance produktů LED je typicky charakterizována měrným výkonem, což je prakticky poměr výkonu k příkonu, tedy vyzařovaný světelný tok (lumen) podělený příkonem (watt). Existuje však několik důležitých nuancí, které nesmí být přehlíženy, například jednotlivé LED čipy ve svítidle mají svůj vlastní měrný výkon (vyšší), který se liší od celkového měrného výkonu samotného svítidla, rozdíl je způsoben řídicím obvodem, tepelnými a optickými ztrátami daného svítidla.



Obr. 4 Blokové schéma zapojení LED svítidla

Výpočet světelného toku svítidla:

$$\Phi = 683 \cdot \int_{380}^{780} P_{out} \cdot V_{\lambda} d\lambda \quad [\text{lm}] \quad (1.1)$$

Kde:

683 – Měrný výkon [lm/W] vyzářený na vlnové délce, na kterou je oko nejcitlivější [555 nm].

P_{out} – Žářivý tok vyzářený ze svítidla [W]

V_{λ} – Spektrální citlivost oka

Známe-li měrný výkon svítidla, můžeme světelný tok nebo zářivý tok vypočítat pomocí vztahu

$$\Phi = K \cdot P_{\text{out}} \quad [\text{lm}] \quad (1.2)$$

$$P_{\text{out}} = \frac{\Phi}{K} \quad [\text{W}] \quad (1.3)$$

Kde:

K – Měrný výkon svítidla [lm/W]

P_{out} – Zářivý tok vyzařený ze svítidla [W]

Φ – Světelný tok svítidla [lm]

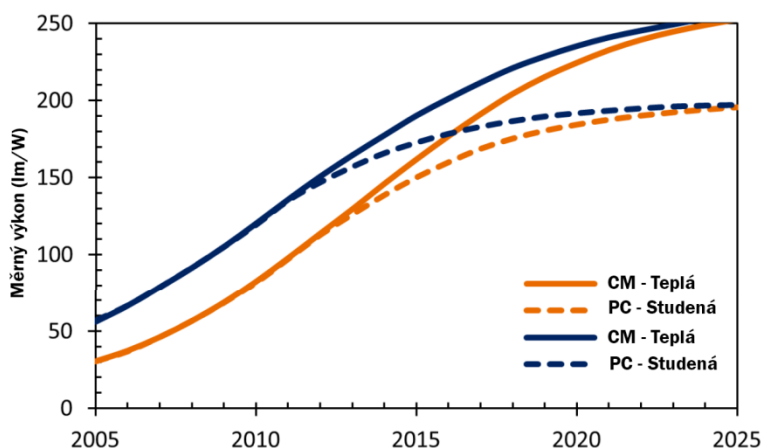
2.1 Měrný výkon čipů

Při specifikaci měrného výkonu LED čipu musíme uvážit tři hlavní proměnné, a to metodu generování bílého světla, kvalitu barev a elektrický proud řídicího obvodu.

Generování bílého světla:

Používáme dvě metody pro generování bílého světla, pomocí luminoforů a RGB míchání. Momentálně jsou LED s luminoforem energeticky nejefektivnější variantou, poskytující měrný výkon čipu větší než 130 lm/W (dnes až 190 lm/W , teoretický limit při $R_a = 95$ je 370 lm/W [8]) a jsou dnes zdaleka nejpoužívanější.

Nicméně díky přídavným ztrátám souvisejícím s přeměnami v luminoforu se předpokládá, že LED čipy s luminoforem budou mít v budoucnu menší potenciální maximální měrný výkon než RGB. [9]



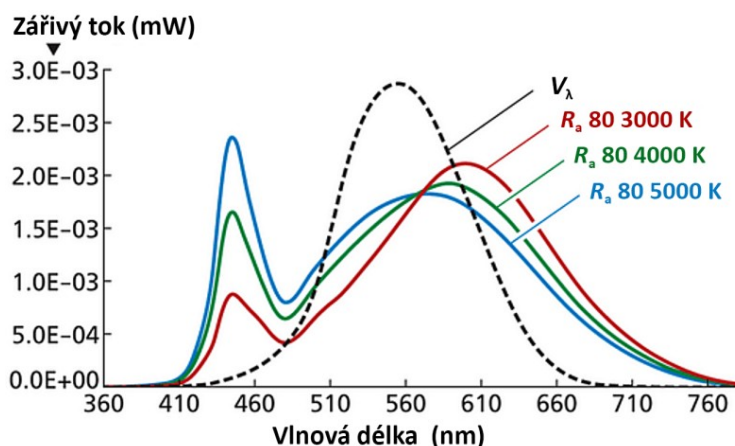
Obr. 5 Předpokládané zvýšení měrného výkonu LED (CM – RGB, PC – LED s luminoforem) [9]

Kvalita barev:

Pro dosažení specifické teploty barvy je nezbytné změnit spektrální rozložení světelného zdroje. Pokud se změní spektrální rozložení, tak se změní i měrný výkon LED, tím pádem čipy s rozdílnou hodnotou náhradní teplotou chromatičnosti nebo indexu podání barev budou mít rozdílné měrné výkony.

Vyšší index podání barev požaduje širší spektrální rozložení a tím pádem budou mít takovéto čipy i nižší měrný výkon.

Teoreticky nižší teplota chromatičnosti nemá vliv na efektivitu, ale díky různým výše uvedeným faktorům jsou studené bílé LED o 20 % efektivnější, než teplé bílé LED. [9]



Obr. 6 Spektrální rozložení zářivého výkonu LED pro různé teploty chromatičnosti s křivkou V_λ [10]

Proud řídicího obvodu:

Napájení LED vyšším proudem zvýší vyzářený světelný tok, avšak vyšší napájecí proud zvýší oteplení PN přechodu a způsobí tak snížení měrného výkonu.

2.2 Měrný výkon svítidel

Tepelné účinky:

Hlavním faktorem při určování velikosti vyzářeného světelného toku je teplota PN přechodu, neboť s rostoucí teplotou se stává proces generování světla čím dál tím méně efektivní a méně lumenů je vyzářeno. Z toho důvodu LED svítidla vyžadují systém tepelného řízení. Na rozdíl od ztrát v řídicím obvodu a optických ztrát, jsou tepelné účinky unikátní pro LED svítidla. Většina výrobců udává parametry svítidla pro teplotu 25 °C (v běžném provozu těžko dosažitelné), pokud tedy uvažíme pracovní teplotu 80 °C, tak může poměrná účinnost klesnout i o 20 % a více (v porovnání s provozem při 25 °C). [9]

Ztráty v řídicím obvodu:

LED svítidla potřebují řídicí obvod, který zahrnuje napájecí zdroj a ovládací obvod. Většina řídicích obvodů transformuje AC napětí a proud na DC a některé zároveň obsahují elektroniku potřebnou ke stmívání a barevnou úpravu. Účinnost řídicích obvodů se snižuje se snižujícím se zatížením.

Řídicí obvody pro LED mají typickou elektrickou účinnost okolo 85 % a zlepšuje se. [9]

Optické ztráty:

Nehledě na typ svítidla, použití čoček, reflektorů nebo jiných optických systémů, které určují distribuci světla, snižuje celkové množství vyzářeného světla a přispívá k rozdílu, mezi měrným výkonem LED čipu a měrným výkonem celého LED svítidla. Optické prvky mají typickou účinnost okolo 85 – 90 %. [9]

3. Barevné vlastnosti LED

Barva světla je určena materiálem polovodiče a velikostí jeho dotace např. fosforem (P) nebo dusíkem (N).

Tab. 2 Typické parametry různých druhů P-N přechodů [1]

Typické LED charakteristiky			
Polovodičový materiál	Vlnová délka	Barva	U_F (při 20 mA)
GaAs	850 - 940 nm	Infračervená	1,2 V
GaAsP	630 - 660 nm	Červená	1,8 V
GaAsP	605 - 620 nm	Oranžová	2,0 V
GaAsP:N	585 - 595 nm	Žlutá	2,2 V
AlGaP	550 - 570 nm	Zelená	3,5 V
SiC	430 - 505 nm	Modrá	3,6 V

Z výše uvedené tabulky můžeme vidět, že hlavním P-donorem je Galium a hlavním N-donorem je Arsen. Problém při použití Galia a Arsenu samotného jako polovodiče je fakt, že většina světla je vyzářena v infračerveném spektru. Toho lze využít například v televizních ovladačích a v různých zařízeních pracujících s detekcí takového světla. Pro použití jako světelný indikátor, případně světelný zdroj, musíme přidat fosfor jako třetí donor, čímž snížíme celkovou vlnovou délku pod 680 nm a dostáváme pro lidské oko viditelné červené světlo.

Další úpravy v procesech dotace PN přechodu zaručily, že můžeme vyrobit LED s viditelným světlem od infračervené po ultrafialové vlnové délky.

Zpravidla se znalostí prahového napětí U_p lze určit velikost vlnové délky emitovaného záření, neboť se zkracující se vlnovou délkou emitovaného světla roste velikost potřebného elektrického proudu a v návaznosti na to také napětí. U klasické diody je velikost prahového napětí 0,6 – 0,7 V, pro infračervenou diodu je úbytek napětí na PN přechodu 1,2 V. [1] [12]

Při uvážení, že při rekombinaci se přemění uvolněná energie na energii emitovaného fotonu:

$$e \cdot U_p = h \cdot f = h \cdot \frac{c}{\lambda} \quad (1.4)$$

Kde:

- e [C] – Náboj elektronu
- U_p [V] – Prahové napětí
- f [Hz] – Frekvence emitovaného záření
- λ [m] – Vlnová délka emitovaného záření
- c [m/s] – Rychlost světla [$3 \cdot 10^8$ m/s]
- h [J.s] – Planckova konstanta [$6,625 \cdot 10^{-34}$ J.s]

3.1 Typy LED

3.1.1 RGB

Technologie RGB diod vychází z fyzikálního principu, kdy mícháním dvou různých vlnových délek světla, lze vytvořit světlo o jiné vlnové délce. Například smícháním zelené a červené barvy získáme žlutou, ubíráme-li postupně zelenou barvu, dostáváme barvu oranžovou, tímto způsobem lze získat libovolnou barvu spadající mezi tyto dvě základní barvy.

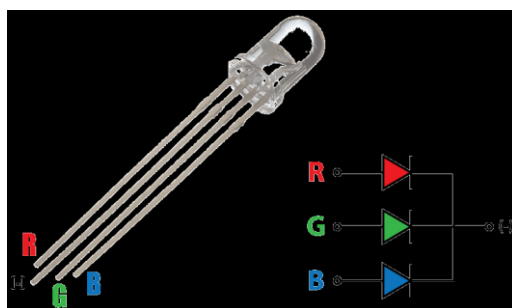
RGB míchání barev bylo prvním typem míchání barev použitým v LED svítidlech a je jedním z nejpoužívanějších dodnes. Tato kombinace je velice efektivní díky tomu, že můžeme získat celou škálu sytých barev, nicméně RGB mícháním barev je obtížné získat opravdu bílou barvu, setkáváme se s nesyťmi barvami a vícebarevnými stíny na krajích.

Pro dlouhodobou stabilitu parametrů takovéto světelné sestavy, resp. udržení neutrálního odstínu bílé, je nutná složitá elektronika, protože LED čipy různých barev mají různé elektrické vlastnosti, různé závislosti svitu na provozních podmínkách včetně teploty a různobarevné čipy i různě stárnou.

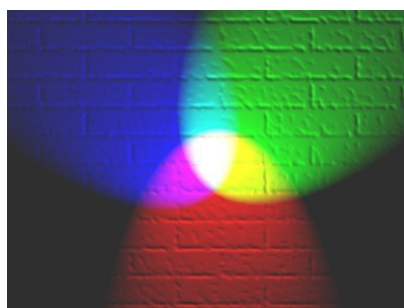
RGB svítidla se používají např. u akvarijního osvětlení nebo osvětlení pro růst rostlin. V těchto aplikacích se ale nejedná o bílou barvu, ale o speciální poměr barevných složek, případně o změnu barevného spektra v čase, a nároky na stabilitu proto nejsou tak kritické.

U speciálních svítidel využívaných např. ve zdravotnictví nebo v laboratoři lze v ploše bílých LED najít jednu nebo více LED svítící dalšími barvami, jedná se o přídavné LED, které posouvají generované barevné spektrum do potřebné oblasti pro zvýšení barevného rozlišení, případně je přidána červená LED zvyšující index R_a /CRI (Color Rendering Index).

Řídicí elektronika takovéto světelné sestavy je pak řešena na principu autokalibrace. [13]



Obr. 7 Běžná RGB dioda [14]



Obr. 8 Míchání RGB [13]

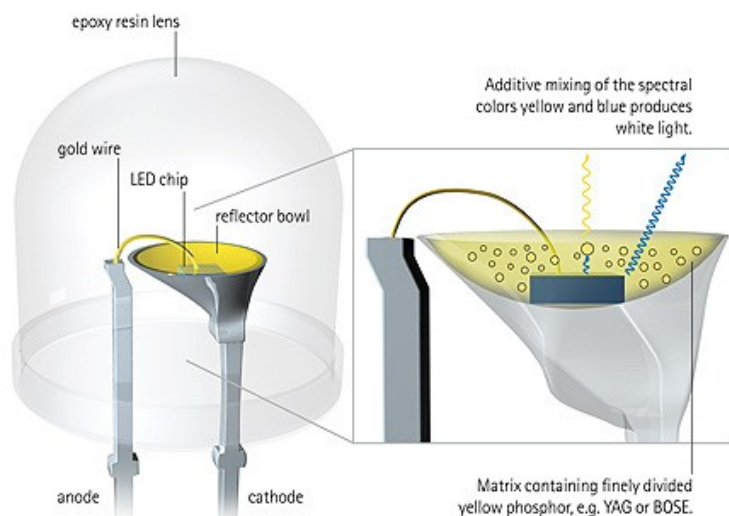
3.1.2 LED s luminoforem

LED využívající tuto technologii se skládají z modré LED a tenké vrstvy fosforu.

Pojmenování těchto materiálu fosfor není úplně přesně, neboť se ve skutečnosti jedná o komplexně dotované soli (např. yttrito-hlinitý granát) podobné materiálům používaným v zářivkových trubiciích a stejně jako v zářivkách s časem a teplem degradují.

Fotony vyzářené modrou LED prolétávají skrz tenkou vrstvu fosforu, kde dochází k nárazu fotonu do atomu fosforu a pohlcení jeho energie, atom se následně dostává na vyšší energetickou hladinu, ve které nemůže dlouhodobě setrvat, vrací se tedy zpět do nižšího energetického stavu a vysílá foton s nižší energií, tedy i nižší vlnovou délkou než původní foton a vzniká foton žlutý. Některé „modré fotony“ proletí skrz vrstvu nedotčeny, touto kombinací modré a žluté jsme schopni

generovat bílé světlo, neboť žluté světlo stimuluje v oku jak červené, tak zelené receptory.



Obr. 9 Složení LED s luminoforem [15]

Generované bílé světlo touto metodou je znatelně lepší, než využitím RGB metody a zároveň je efektivnější, a to i přes určitou ztrátu při přeměně „modrého fotonu“ na žlutý. Díky převládající efektivitě a vysokému R_a indexu (typicky 85 i více), jsou fosforové bílé diody jedny z nejpoužívanějších.

Při výrobě těchto LED je přesný odstín bílé dán dominantní vlnovou délkou diody a složením fosforové vrstvy, se zvyšující se tloušťkou fosforové vrstvy dostáváme teplejší odstín bílé. S rostoucí degradací modré led diody a fosforové vrstvy se můžeme setkat s různými posuny v barvě, k tomuto posunu také dochází, pokud LED pracuje s jiným elektrickým proudem, nebo při jiné pracovní teplotě. [15]

3.2 Míchání teplé a studené barvy světla

Trend ve vývoji osvětlení je přiblížit osvětlení co nejvíce přirozenému dennímu světlu, tedy získat svítidlo, které dokáže dynamicky měnit nejen intenzitu osvětlení, ale také teplotu vyzařovaného světla a získat tak osvětlení přinejmenším přirozenější.

Proměnlivou bílou lze stimulovat, nebo naopak potlačit cirkadiální rytmus, což je výhodné zejména při použití v místnostech s využitím po dobu 24 hodin. V průběhu dne může být teplota světla měněna v závislosti na denním světle, nebo v závislosti na aktivitě, která je v místnosti prováděna.

Technologie míchání teplé a studené barvy světla v základu využívá dvě LED, jednu s teplotou barvy bílé a druhá se studenou. Pomocí elektroniky je poté možné snižováním intenzity vyzařování jednotlivých LED měnit teplotu vyzařovaného světla. Pro plynulejší přechod mohou být využity i tři, čtyři, pět a potenciálně i sedm LED s různými teplotami bílé. [16]

Dnes se využívají tři typy změny teploty světla LED svítidla.

3.2.1 Stmívání do teplé (Dim-To-Warm)

Produktům využívající tuto technologii se také říká tepelně stmívatelné, inkadescenčně stmívatelné, mimikující inkadescenčně nebo halogenové stmívání. Obvykle jsou navrhovány pro 2700 – 3000 K při plném výkonu a se snižujícím se výkonem do teploty až na 1800 K (což je teplota světla

vyzařovaného svíčkou). [16]

Ovládání:

Protože stmívání takového produktu je spojeno se změnou barvy, je zde pouze jeden kontrolní signál a tím pádem jeden kontrolér na každou skupinu svítidel, které se stmívají společně.

Některé systémy jsou schopny dosáhnout této funkce pomocí fázi-ořezávacího stmívače, kde je informace o stmívání přenášena pomocí napěťové vlny, tento způsob ale nemá takovou stmívající přesnost a hladkost jako systém využívající 0-10V, DALI nebo DMX protokol. Tyto tři způsoby využívají oddělené vodiče na intenzitu/barvu signálu a napájení svítidla. Alternativně mohou být svítidla vybavena bezdrátovým přijímačem ovládaným bezdrátovým vysílačem využívajícím Wi-Fi nebo, Bluetooth.

Potenciální problémy:

Uživatelné někdy mohou chtít snížit intenzitu osvětlení bez změny barvy.

Některá svítidla využívající stmívání do teplé obsahují pouze bílé LED v kombinaci s oranžovými LED, které vyzařují pouze v úzkém spektru vlnových délek. Při velmi vysoké intenzitě stmívání může nastat stav, kdy vyzařují pouze oranžové LED, které ač vyzařují teplou barvu světla, mají nízký index podání barev a prvky interiéru tak mohou vypadat nepřírozně.

Účinnost takovýchto svítidel je obvykle nižší než u svítidel s fixní teplotou bílé.

3.2.2 Nastavitelná bílá (Tunable-White)

Některé svítidla s nastavitelnou bílou, mají dvě sady bílých LED pokrytých luminoforem, kde jedna vyzařuje teplou bílou (obvykle 2700 K) a druhá vyzařuje studenou bílou (obvykle 5000 K - 6500 K).

Individuálním snižováním nebo zvyšováním výkonu jednotlivých LED, můžeme dosáhnout barevného výstupu ležícího mezi těmito dvěma primárními barvami a zároveň lze docílit přímé linie, která je spojuje na chromatickém diagramu (to nazýváme **lineární nastavení bílé**).

Pokud jsou využity pouze dvě bílé LED, tak výrobce musí určit, kde se nastavená bílá barva bude nacházet v návaznosti na křivku černého tělesa. Jestli bude mít barva bílého světla růžovější nebo fialovější nádech při přecházení z jedné teploty na druhou. Tím že je křivka černého tělesa zahnutá, tak jí dvě barvy bílé nemohou následovat a s vyšším rozsahem nastavení bílé se tato nepřesnost zvyšuje. V tom případě je výhodné využít tři a více LED o různých teplotách bílé a zajištění tak plynulejšího a přirozenějšího přechodu mezi jednotlivými teplotami (to nazýváme **nelineární nastavení bílé**). [16]

Aplikace:

Nastavení teploty bílé lze využít příklad pro pocit ohřívání nebo ochlazování místnosti – To může vytvořit psychologický efekt, kdy studenější osvětlení způsobí, že se člověk bude cítit chladněji v letních dnech a naopak.

Nastavení teploty světla na individuální preference nového uživatele, což lze využít například v hotelu.

Změna teploty v závislosti na teplotě denního světla.

Na podporu cirkadiánního systému nebo jeho vyrovnání jako léčbu po cestování letadlem nebo při potížích se spánkem.

Ovládání:

Ovládání je kritickým elementem v systémech s nastavitelnou teplotou bílé, neboť nejlepší produkty mají sofistikované algoritmy, které zajišťují, že při změně teploty nedochází ke změně světelného toku. Tyto algoritmy jsou zabudovány do řídicího obvodu nebo rozhraní mezi ovladačem a řídicím obvodem.

Systémy využívající nastavitelnou bílou požadují oddělené napájení pro řídicí obvod a ovládací signál, běžně se tedy využívají dva stmívače, jeden pro změnu intenzity osvětlení a druhý pro změnu barvy.

Nejběžnější ovládací protokoly jsou 0-10V, DALI, DMX nebo systém, kde svítidla jsou napájena přes silové rozvody budovy a obsahují obvody ovládané pomocí Wi-Fi nebo Bluetooth.

Potenciální problémy:

Nižší účinnost než svítidla s fixní teplotou světla.

Komplexnější zapojení a ovládání než běžné LED svítidla.

3.2.3 Plnobarevně nastavitelné (Full-Color-Tunable)

Tyto produkty se nazývají například RGB, RGBA, RGBW, spektrálně nastavitelné, barevně nastavitelné. Svítidla obvykle obsahují tři a více různých druhů LED, které mohou vytvořit bílé světlo, odstín bílé nebo satureovanou barvu. Jednotlivé LED můžou vyzařovat v úzkém spektrálním pásmu (červená, modrá atd.) nebo dokonce monochromatické s vrstvou luminoforu, který rozšíří vyzařované spektrální pásmo (světle zelená je modrá LED s vrstvou luminoforu), nebo bílé LED vytvořené pokrytím modré nebo fialové LED vrstvou luminoforu.

Minimální počet LED pro plnobarevné nastavení jsou tři, ale běžně se využívá pět a více. [16]

Ovládání:

Plnobarevně nastavitelné svítidla využívají komplexní algoritmy a obvody pro dosažení jednotlivých barev. Ovládací protokoly jsou DMX, DALI nebo bezdrátové ovládání a svítidlo musí být napájeno separátně od ovládacích signálů intenzity osvětlení a barvy světla.

Aplikace:

Výhodou tohoto typu barevného nastavení je možnost nastavení barvy osvětlení mimo křivku černého tělesa a posunout barvu bílého světla do odlišných barev. Můžeme tedy například zvýraznit určitou barvu pod daným svítidlem (zelenější rostliny atp.).

Využití je tedy zejména v divadlech, v zábavních parcích nebo restauracích.

Potenciální problémy:

Úplné nastavení osvětlení, které bude korespondovat s jiným světelným zdrojem, může být obtížné, neboť se naskytá spousta možností jak vytvořit teplotu světla 3000 K ze zdroje se třemi a více LED ale žádná neposkytuje totožný vzhled nebo index podání barev.

RGB dokáže vytvořit téměř nekonečné množství barev, ale může docházet k nadměrné nebo nedostatečné saturaci jednotlivých barev a tedy k celkovému zkráslení barev.

Prozatím je účinnost svítidla nižší než při použití LED svítidla s fixní bílou, neboť zelené LED mají nižší účinnost než bílé LED, což snižuje celkovou účinnost. [16]

4. Kvalitativní a kvantitativní parametry

4.1 Kvalitativní parametry

4.1.1 Životnost

Životnost světelných zdrojů je odhadována na základě postupů stanovených v průmyslových rozvodech. Testování probíhá s určitým počtem svítidel, která svítí v provozu, dokud 50 % z nich neselže. Tento časový údaj se nazývá **jmenovitá životnost světelného zdroje** (dle normy ANSI/IES RP-16).

LED technologie se však oproti klasickým světelným zdrojům liší:

- LED neselhávají náraz jako tradiční světelné zdroje, ale pomalu degradují.
- Díky velmi dlouhé životnosti je velice problematické získávat data o jejich dlouhodobé spolehlivosti z reálných svítidel.
- Světelný výkon a životnost LED je velmi závislý na elektrických a teplotních podmínkách, které jsou dány zejména samotným svítidlem a návrhem celého systému.

Dalším druhem životnosti je **užitečná životnost**, jedná se o počet hodin v provozu, po kterých světelný výkon celé osvětlovací soustavy neklesne pod 70 %, jelikož z výsledků průzkumu bylo zjištěno, že lidské oko nezaznamená pokles světla, dokud není pokles větší než 30 %.

Průměrná užitečná životnost LED se většinou pohybuje v rozsahu 25 000 až 60 000 hodin. [17]

V dobře navrženém systému s dobrým odvodem tepla je LED tím nejsilnějším článkem a dá se předpokládat, že dříve než samotná LED selže její napájecí obvod, kde jako nejproblematictější se jeví filtrační elektrolytické kondensátory, protože obsahují gel, který se při vyšších teplotách odpařuje a kondenzátoru se tak snižuje jeho kapacita a zvyšuje ESR (equivalent series resistance) neboli vnitřní odpor.

4.1.2 Vyzařovací úhel

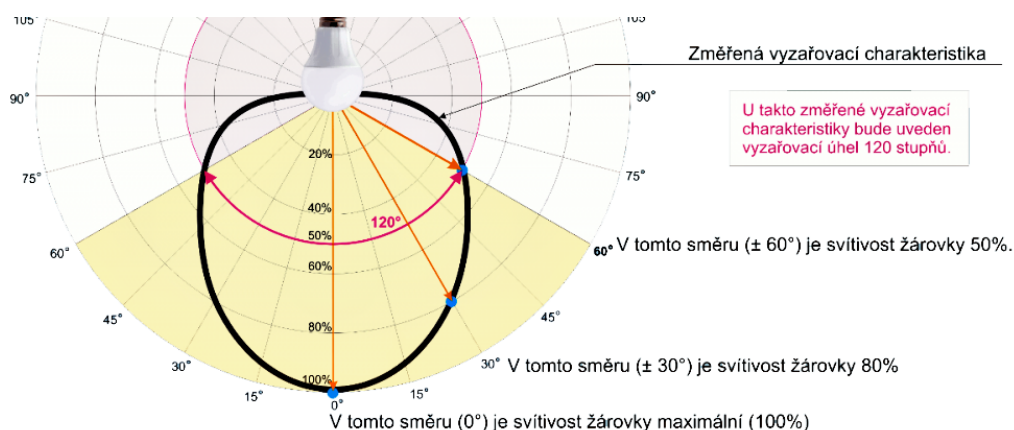
Udává, pod kterým úhlem je světlo vyzařované ze světelného zdroje v dostatečné intenzitě. Za bodové zdroje považujeme zdroje s vyzařovacím úhlem okolo 45 - 90°, při vyšším úhlu mluvíme o plošných svítidlech.

Typické vyzařovací úhly:

- 60° → Setkáváme se u bodových žárovek a svítidel. Představme si kužel, jehož vrchol je zdrojem světla a při výšce 1m by tento kužel vykreslil kruh o průměru přibližně 115 cm.
- 90° → Zde můžeme stále uvažovat svítidla jako směrová s koncentrovanějším paprskem světla. Zde by kužel s výškou 1 m vykreslil v základně kruh o průměru přibližně 200 cm.
- 120° → Již se jedná o světla s větším rozptylem, schopná osvětit větší plochu. Kužel umístěný ve výšce 1m nám vykreslí kruh o průměru 346 cm.
- 160° → Jedná se o světla s velkým rozptylem schopná osvětit velkou plochu. Kužel ve výšce 1m vykreslí kruh o průměru základny 1134 cm. Takovéto svítidlo je již schopno pokrýt větší místnost.
- 180° → Zde se jedná nejčastěji o stropní svítidla jejich účelem je poskytnout rovnoměrné rozložení osvětlení a osvětit celý prostor.

- $300^\circ \rightarrow$ Svítidla se dají již téměř označit za všesměrová.
- $360^\circ \rightarrow$ Svítidla jsou všesměrová a určená k osvětlení velkých prostor. [18]

Pro určení úhlu vyzařování se bere v úvahu část vyzařovaného světla, která září alespoň 50 % intenzitou oproti tomu, co žárovka vyzařuje kolmo. Například svítidlo s vyzařovacím úhlem 120° může svítit i za hranicí 120° , jenže světlo je již slabší než 50 % intenzity světla, které dopadne kolmo).



Obr. 10 Vyzařovací charakteristika LED žárovky s vyznačeným vyzařovacím úhlem [19]

4.1.3 Všeobecný index podání barev

Po světelném toku se jedná o druhý nejdůležitější parametr osvětlení, neboť rozhoduje o tom, jak se v osvětleném prostoru budeme cítit.

R_a (anglicky CRI) index vyjadřuje, jak věrohodně dokáže světelný zdroj reprodukovat barvy v porovnání s přirozeným slunečním světlem. Hodnoty R_a indexu se pohybují od 0 do 100, kde hodnota 0 je monochromatický zářič a nelze pod ním rozpoznat jednotlivé barvy a 100 je světelný zářič s ideálním podáním barev.

Kvalitní LED dosahují R_a indexu většího než 85, kdežto u levných LED se index podání barev pohybuje kolem 60 až 70. Pro komerční použití se setkáváme s čipy s indexem maximálně 90, kde nám již podstatně klesá svítivost, neboť je zde fosforová vrstva podstatně hutnější. Při porovnání čipů stejné kvality s R_a indexem 70 a 80 je rozdíl světelného toku přibližně 15 %.

Pro obytné prostory jsou vhodné LED s R_a vyšším než 80, a to zejména do koupelen, pro venkovní prostory a průmysl pak vyšší než 65. [20]

4.1.4 Náhradní teplota chromatičnosti

Teplota chromatičnosti je rovna teplotě absolutně černého tělesa, jehož záření má stejnou chromatičnost, jako uvažované záření. Neboť některé zdroje světla nevyzařují na všech vlnových délkách a jejich světelné spektrum je nespojité, zavedla se náhradní teplota chromatičnosti.

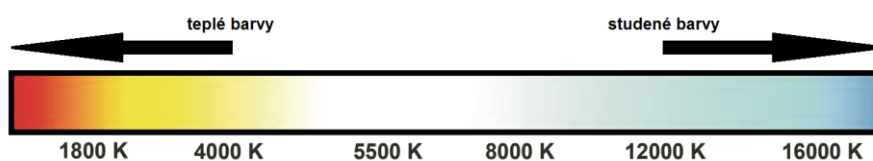
Náhradní teplota chromatičnosti udává, jak vnímáme bílou barvu vyzářenou světelným zdrojem. Náhradní teplota chromatičnosti porovnává odstín bílého světla zkoumaného zdroje s bílým světlem ideálního zdroje, vyjadřuje se zkratkou T_c a je udávána v Kelvinech.

Jedná se o poměr modré a červené složky spektra v posuzovaném bílém světle. Při převládající modré složce se nám světlo jeví jako studenější a naopak. Například světlo klasické žárovky obsahuje

jen malé množství modré složky a velké množství červené složky a světlo se tedy jeví jako teplá oranžová, teplota chromatičnosti je 2700 – 3000 K. Na druhou stranu např. svářecí oblouk vyzařuje světlo s vysokým obsahem modré složky a nízkým obsahem červené složky a světlo se tak jeví jako velmi studené s náhradní teplotou chromatičnosti okolo 12 000 K.

Při návrhu osvětlení si musíme uvědomit, že teplota světla významně ovlivňuje, jak se v místnosti cítíme, např. nevytopená místnost s teplejší barvou světla se jeví jako teplejší, než při osvětlení s namodralým studeným světlem.

Náhradní teplota chromatičnosti by se tedy pro obytné a pracovní prostory měla pohybovat v rozmezí od 2700 K do 6000 K. [21]

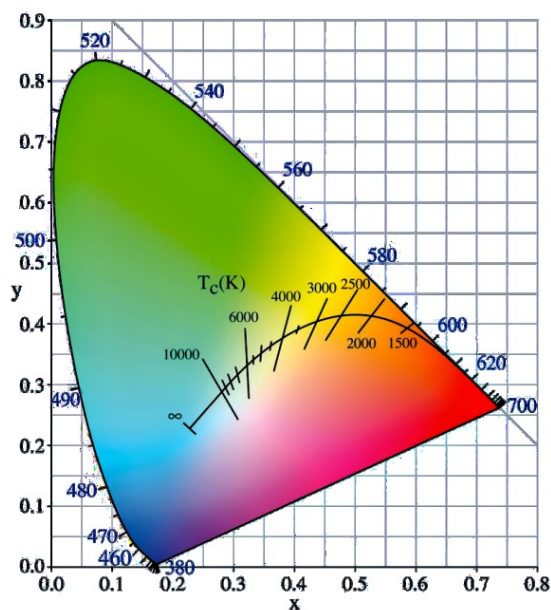


Obr. 11 Spektrum teploty barvy světla [20]

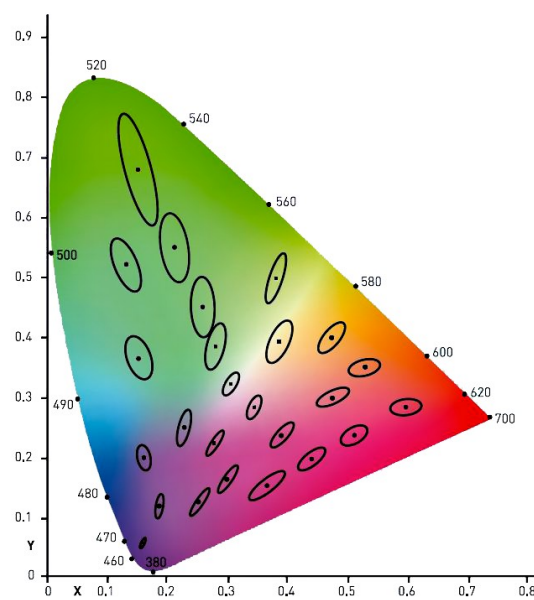
4.1.4.1 Odchylka teploty chromatičnosti

Díky různým odchylkám způsobeným při výrobě LED čipů dochází také k odchylkám u teploty chromatičnosti. Z toho důvodu se LED čipy testují a jsou tříděny do skupin nazvaných „bin“. Jeden bin odpovídá stejné či podobné teplotě chromatičnosti s definovanou odchylkou barevného tónu.

Při popisu odchylky se využívají MacAdamovy elipsy, které určují oblasti barev, která jsou pro člověka nerozlišitelné.

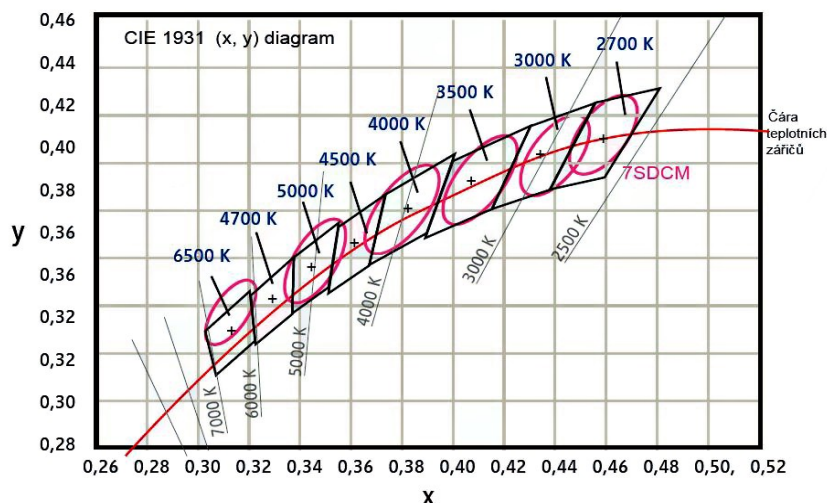


Obr. 12 Trichromatický trojúhelník s křivkou teplotních zářičů [8]



Obr. 13 Trichromatický trojúhelník s MacAdamovými elipsami [8]

Křivka teplotních zářičů v trichromatickém trojúhelníku vyznačuje bílou barvu s různou teplotou chromatičnosti. Na obrázku níže jsou pak vykresleny MacAdamovy elipsy pro bílou s různou teplotou chromatičnosti.



Obr. 14 Křivka teplotních zářičů s MacAdamovými elipsami [8]

V praxi jsou elipsy několikanásobně rozšířeny, od trojnásobku prahové hodnoty jsou již rozdíly vnímatelné. Odchytky se označují jako např. 2 SDCM (standart deviations of colour matching), tedy dvojnásobek prahové hodnoty. Jak již bylo zmíněno, tak luminofor na LED čipu stárne a s tím se také zvyšuje odchylka teploty chromatičnosti od původního tónu a odchylka se proto uvádí jako počáteční a udržovaná (po určitém počtu provozních hodin, 25 % jmenovitého života). [8]

4.1.4.2 Fotometrický kód

Fotometrický kód světelného zdroje udává index podání barev a teplotu chromatičnosti. Například LED s číslem 840/359

Tab. 3 Příklad fotometrického kódu [8]

8	4	0	/	3	5	9
Index podání barev	Teplota chromatičnosti			Počáteční odchylka teploty chromatičnosti	Udržovaná odchylka teploty chromatičnosti	Stálost světelného toku

Daná LED bude mít index podání barev 80, teplotu chromatičnosti 4000 K, odchylku teploty chromatičnosti jako 3. násobek MacAdamovy elipsy na počátku a 5. násobek po 25 % jmenovitého života, v neposlední řadě bude světelný tok ≥ 90 % počáteční hodnoty světelného toku po 25 % jmenovitého života. [8]

4.2 Kvantitativní parametry

4.2.1 Světelný tok

Světelný tok se značí písmenem Φ s jednotkou **lm** (lumen), označuje světelnou energii vyzářenou za 1 sekundu a můžeme tedy říci, že se jedná o formu světelného výkonu. Jako **1 lm** se označuje světelný tok vyzářený zdrojem o svítivosti **1 cd** do prostorového úhlu **1 sr**. Velikost této jednotky nám říká, kolik bude jaké svítidlo svítit (z pohledu oka) a můžeme se s ním tedy setkat na obalu světelných zdrojů. Vztahuje se k teplotě okolí 25 °C a jedná se o světelný tok celého svítidla a není pouhým součtem světelných toků LED čipů. [23]

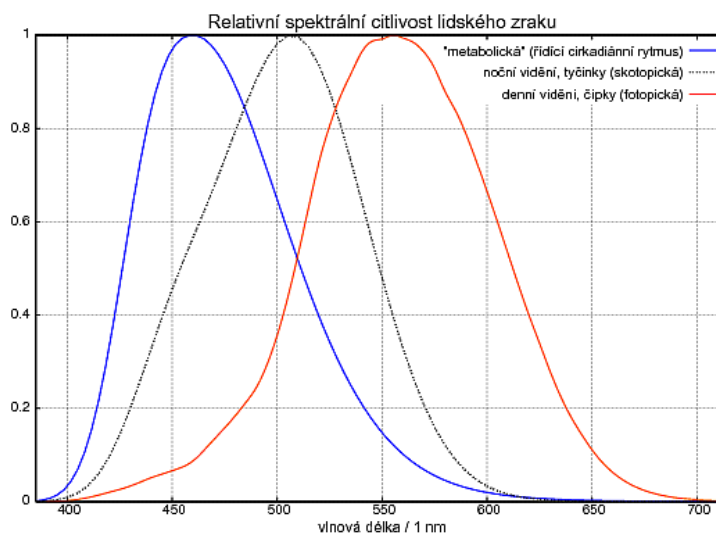
4.2.2 Příkon

Příkonem rozumíme spotřebu elektrické energie všech elektrických zařízení ve svítidle. U klasických žárovek bylo možno vybírat žárovky dle jejich příkonu a platilo vyšší příkon = větší množství světla, u LED se ale můžeme setkat s žárovkou o příkonu 8 W, která bude mít menší světelný tok než žárovka o příkonu 6 W, v tomto případě přichází v úvahu měrný výkon světelných zdrojů.

4.2.3 Měrný výkon

Značí se **K** a vyjadřuje, s jakou účinností přeměňuje světelný zdroj vstupní energii na světelnou energii. Měrný výkon je definován jako světelný tok na watt neboli lm/W. U světelných zdrojů s předřadníkem nebo tlumivkou musíme uvažovat i se ztrátami v těchto prvcích.

Velikost měrného výkonu se odvíjí od spektrální citlivosti oka, světelný zdroj může mít tedy maximální „účinnost“ pouze v případě, že dokáže veškerou elektrickou energii přeměnit na světelnou a vyzářit na vlnové délce 555 nm (bavíme-li se o denním vidění).



Obr. 15 Relativní spektrální citlivost oka [24]

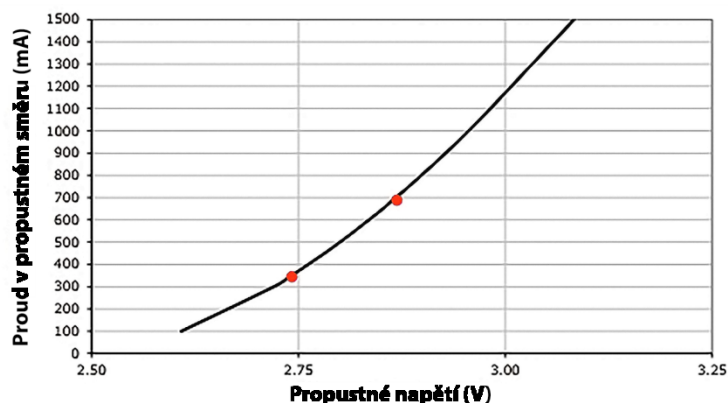
5. LED svítidla

5.1 Požadavky

Svítidla se navrhují pro konkrétní aplikační oblast nebo zřakový úkol a tomu se přizpůsobuje daný tvar, vzhled svítidla a charakter vyzařování. Hlavními požadavky, které musí svítidlo splňovat je vhodné rozložení svítivosti, úprava křivky svítivosti, vhodné clonění, dobrá provozní účinnost a vhodný jas světelně činných částí.

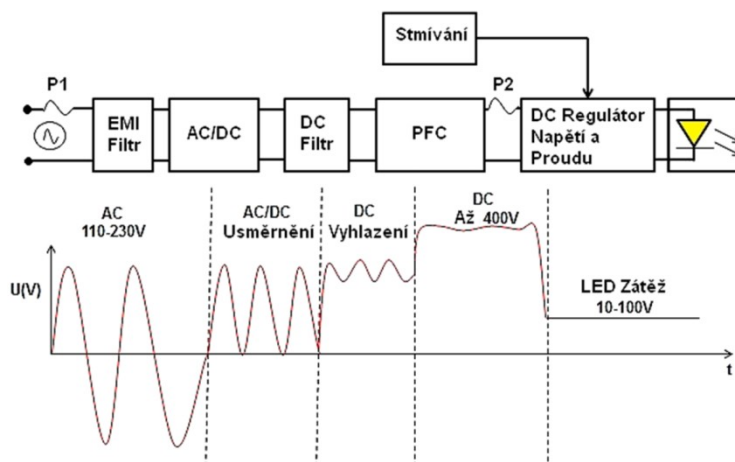
5.2 Napájení

Hlavním úkolem LED zdroje je přeměna střídavého napětí a proudu na stejnosměrné napětí a proud. Dále pak slouží na ochranu LED před napětovým a proudovým kolísáním, neboť změna napětí může změnit proud dodávaný do LED a jak již bylo zmíněno, tak se změnou proudu se úměrně tomu mění světelný tok. Z principu funkce LED (viz V-A charakteristika v kapitole 2) vyplývá, že závislost proudu na napětí je exponenciální → malá změna napětí vyvolá velkou změnu proudu.



Obr. 16 Změna velikosti proudu při změně napětí na LED diodě [26]

LED svítidla lze napájet jak zdrojem konstantního proudu, tak zdrojem konstantního napětí a jejich použití záleží na druhu napájené LED.



Obr. 17 Blokové schéma typického LED předřadníku [30]

5.2.1 Zdroj konstantního proudu

Zdroj konstantního proudu používáme pro napájení LED vyžadující konstantní hodnotu proudu při proměnném výstupním napětí. Na zdroji bude uveden dodávaný proud v mA a rozmezí výstupního napětí, které se bude měnit dle připojené zátěže ve Wattech. Tento typ zdroje je nejlepší varianta pro napájení výkonných LED, neboť udržuje konstantní proud a tím také jas všech LED zapojených v sérii, zároveň eliminuje změnu proudu v závislosti na změně teploty LED (Odpor polovodiče se s teplotou snižuje → snižuje se U_F → zvyšuje se proud tekoucí diodou).

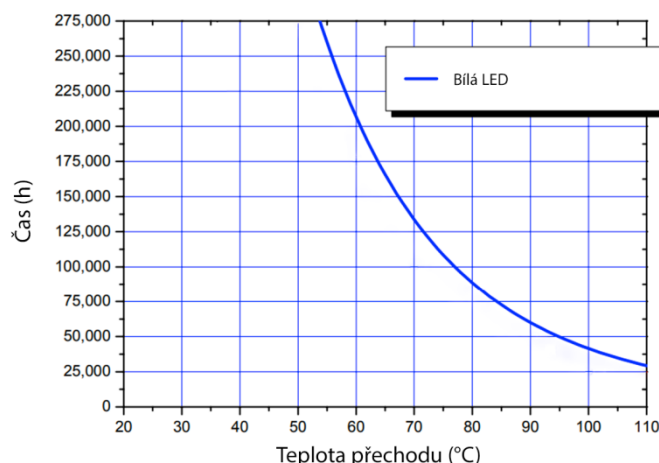
5.2.2 Zdroj konstantního napětí

Zdrojem konstantního napětí lze napájet speciálně navržené LED, které již mají svou regulaci proudu buď za pomoci rezistoru navrženého na určité napájecí napětí, nebo pomocí interního zdroje konstantního proudu v samotném modulu LED. Typické LED využívající tento typ zdroje jsou LED pásy (typické napětí zdroje je 12 - 24 V). [25]

5.3 Odvod tepla

Odvod tepla je relativně nová překážka v osvětlovacím průmyslu, neboť v dřívějších dobách se nebylo nutné zabývat odvodem tepla z inkandescenčních nebo fluorescenčních světelných zdrojů.

Teplo vytvořené v LED se musí odvést její zadní stranou, aby byla zajištěna optimální teplota na P-N přechodu, neboť hlavní příčinou selhání LED svítidel je nesprávné řešení odvodu tepla. Spousta pracovních charakteristik LED je ovlivněna pracovní teplotou, u některých parametrů LED nastávají vratné změny, jako například u světelného toku, barvy a napětí, zatímco některé změny parametrů jsou již nevratné, jako například životnost LED. Jak již bylo zmíněno, dnešní LED jsou schopny převést elektrickou energii na světelnou až s 50 % účinností, ale pořád je třeba odvést 50 % elektrické energie, která se mění na teplo. U některých typů LED je možné snížením teploty o pouhých 10 °C zvýšit životnost LED až o 50 %.



Obr. 18 Závislost životnosti LED na teplotě P-N přechodu [28]

Tepelná energie, která musí být z LED čipu odvedená, se dá vypočítat jako:

$$P_t = \eta \cdot U \cdot I \quad (1.5)$$

Kde:

P_t – Tepelná energie [W]

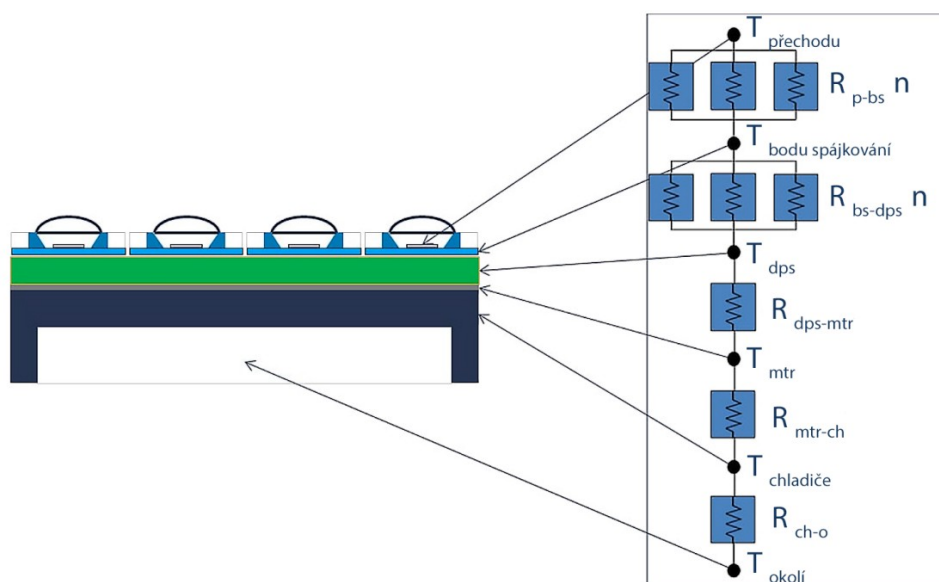
η – Účinnost LED [-]

U – Úbytek napětí na LED v propustném směru [V]

I – Napájecí proud LED [A]

Tepelná energie je odváděna z LED čipu pomocí všech druhů přestupu tepla, a to pomocí konvekce, kondukce a záření. Směrodatný je pro nás ale pouze odvod tepla pomocí konvekce a kondukce, neboť odvod tepla pomocí záření je při teplotách, na kterých LED pracuje velmi malý a nedostatečný.

Tepelný model LED lze sestavit z odporů podobně jako v elektrických obvodech. Můžeme si představit jednotlivé tepelné odpory jako rezistory, tepelný tok jako elektrický proud a jednotlivé rozdíly teplot mezi jednotlivými rozhraními jako elektrické napětí.



Obr. 19 Tepelný obvod klasické LED [29]

Kde:

T – Teplota jednotlivých rozhraní [°C]

R – Tepelný odpor mezi jednotlivými rozhraními [°C/W]

n – Počet LED čipů na jednom obvodu

dps – Deska plošných spojů

mtr – Materiál teplotního rozhraní (např. teplovodivá pasta)

Z nákresu je zřetelné, že teplo je odváděno kondukcí z P-N přechodu do tištěného spoje LED a skrze tepelně vodivou pastu do chladiče, kde je teplo odvedeno konvekcí a zářením do okolního prostředí.

Černé body ve schématu znázorňují individuální místa, kde může být měřena teplota. Odpory představují tepelné odpory jednotlivých částí. Například R_{p-bs} reprezentuje tepelný odpor mezi P-N přechodem a bodem spájení.

Jednotlivé tepelné odpory poté lze vypočíst jako:

$$R_{ab} = \frac{T_a - T_b}{P_t} \quad (1.6)$$

Kde:

T_a – Teplota v bodě **a** [°C]

R_{ab} – Tepelný odpor mezi body **a** a **b** [°C/W]

P_t – Tepelná energie [W]

[29]

5.3.1 Chladič

Chladič slouží k odvedení tepla z LED kondukcí a následnému odvedení tepla do okolí pomocí konvekce a záření. Chladič tedy musí mít velkou plochu, ze které se teplo bude konvekcí odvádět, dobrou tepelnou vodivost a dobrou emisivitu, aby se nadbytečné teplo mohlo vyzařovat do okolí. V některých případech mohou být chladiče spojeny s kryty svítidel ke zvýšení chladičí plochy.

Chladiče lze rozdělit podle jejich konstrukce na pasivní a aktivní.

5.3.1.1 Pasivní chladič

Využívá se přirozených vlastností chladičího média (vzduchu), kde dochází k odvádění ohřátého vzduchu přirozeným prouděním. Chladič se skládá z podstavy, která je ve styku s LED diodou a žebrovím, pomocí kterého se teplo předá do okolního prostředí.

5.3.1.2 Heatpipe

Využívá k přenosu tepla z jednoho místa na druhé pracovní látku. Jedná se o hermeticky uzavřený kovový válec naplněný tekutinou (voda, alkohol, propan-butan, čpavek atd.) a je zasazen na jednom konci do zdroje tepla a na druhém konci do chladiče. Po dosažení pracovní teploty dochází k odpařování pracovní látky a jejímu následnému proudění do chladiče, kde kondenzuje a chladič tak předává část tepelné energie. Tento pohyb je zajištěn změnou tlaků v místě výparníku (vyšší tlak) a v místě kondenzátoru (nižší tlak). [35]

5.3.1.3 Aktivní chladič

Jedná se o druh chlazení, které využívá nuceného pohybu chladičího média. V případě vzduchu dochází k nucenému pohybu za pomoci ventilátoru, který žene chladičí médium skrz žebra chladiče.

Oproti pasivnímu chladiči je zde možnost využití menšího chladiče, jelikož chladičí médium je odváděno od chlazeného zařízení rychleji. Nevýhodou oproti pasivnímu chladiči je dodatečná spotřeba elektrické energie potřebné pro provoz ventilátoru a díky tomu snížení elektrické účinnosti celého zařízení.

5.4 Optika

Optika je jedním z nejdůležitějších prvků LED osvětlení, jelikož tvaruje, zaostřuje a mísí světlo generované LED svítidly, je tak důležitá pro dosažení co nejefektivnějšího výkonu ze svítidla a pro efektivní míchání barev.

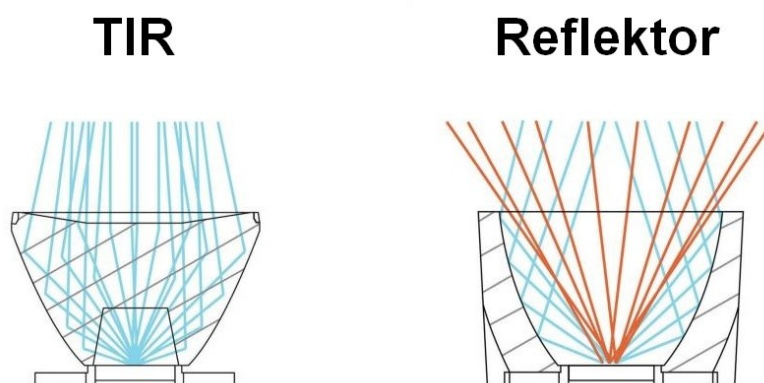
Mnoho LED svítidel používá jak primární tak sekundární optiku.

Primární optika je zabudovaná do LED samotné a obvykle má podobu malé kupole a je navržena tak, aby maximalizovala užitečný světelný výkon LED.

Sekundární optika, jako jsou TIR (Total Internal Reflection) čočky nebo reflektory, se pak používají k tvarování světla a jsou také stěžejní pro svítidla s barevným mícháním, protože určují, jak dobře se budou jednotlivé barvy míchat.

Reflektory jsou obvykle tvarované jako kužel umístěny okolo LED, mohou být kovové nebo hliníkem pokovené a s rozličnou povrchovou úpravou. Nevýhodou reflektoru je fakt, že světlo může minout parabolický reflektor a stát se tak světlem oslňujícím.

Čočky jsou nejčastěji TIR typu, které se skládají z refrakční čočky umístěné uvnitř reflektoru a jsou typicky kuželovitěho tvaru s optickou účinností až 92 %. Čočka nasměruje světlo ze středu zdroje na reflektor, který ho vysílá do řízeného paprsku. [31]



Obr. 20 Rozdíl v distribuci světelných paprsků u TIR a Reflektoru [31]

5.5 Možnosti omezení oslnění

Oslnění je vizuální pocit, který lze charakterizovat, jako nadměrně jasné unikající světlo, které je v zorném poli jednotlivce a způsobuje zrakové nepohodlí nebo omezení dané osobě.

Oslnění se dělí na dva druhy – Omezující oslnění a Rušivé oslnění.

Omezující oslnění je snížení viditelnosti způsobené intenzivními zdroji světla v zorném poli.

Rušivé oslnění je pocit nepříjemnosti nebo bolesti vyvolané přílišným jasnem světelných zdrojů.

Oslnění je tedy příčina vysokého jasu svítidla, či špatného kontrastu jasů, ze vzorce pro jas tedy můžeme určit možnosti jeho snížení.

$$L = \frac{dI}{dS \cdot \cos^2(\theta)} \quad (1.7)$$

Kde:

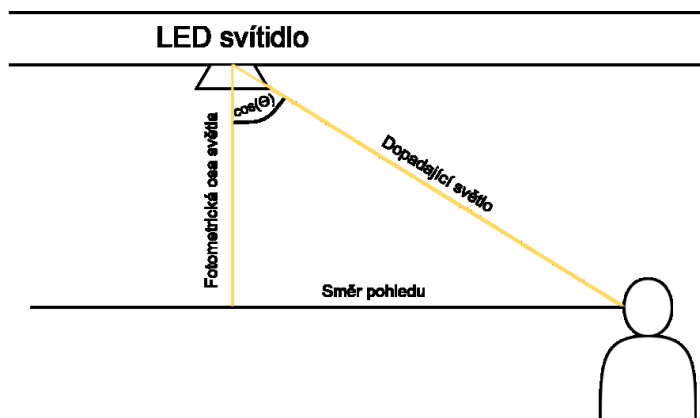
L – Jas svítidla [cd/m^2]

S – Velikost svítící plochy [m^2]

I – Svítivost daného svítidla [cd]

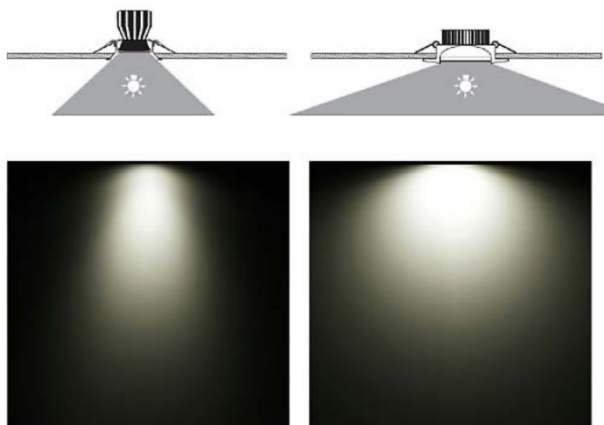
$\cos(\theta)$ – Úhel, pod kterým svítící plochu vidíme

Ze vztahu je zřejmé, že jas svítidla lze omezit vhodným umístěním svítidel, použitím stínění nebo zvětšením svítící plochy.



Obr. 21 Vyobrazení úhlu $\cos(\theta)$

Nejefektivnější způsob jak snížit riziko oslnění již při návrhu světla, je realizace **stínění** do samotné geometrie svítidla, které způsobí, že normálně unikající světlo (světelný přesah) bude přeměřováno do zamýšlené osvětlované zóny. Toho lze dosáhnout za použití reflektoru, čočky nebo zapuštěním svítidla. [32]



Obr. 22 Směrování unikajícího světla za pomoci zapuštění svítidla [32]

Další možností, jak zamezit oslnění je použití **difuzoru**. Tento systém poskytuje homogenní světlo s optimální úrovní kontrastu, zároveň opticky zvyšuje vyzařovací plochu daného svítidla, čímž se zabrání přímému nebo odraznému oslnění. Oslnění omezující účinek difuzoru je dán zejména jeho zpracováním a použitým difuzním materiálem, neboť nekvalitní difuzor může udělat přesný opak toho, co požadujeme, a to posunout svítící plochu o vysokém jasu níže.



Obr. 23 Stropní svítidlo bez difuzoru a s difuzorem [33]

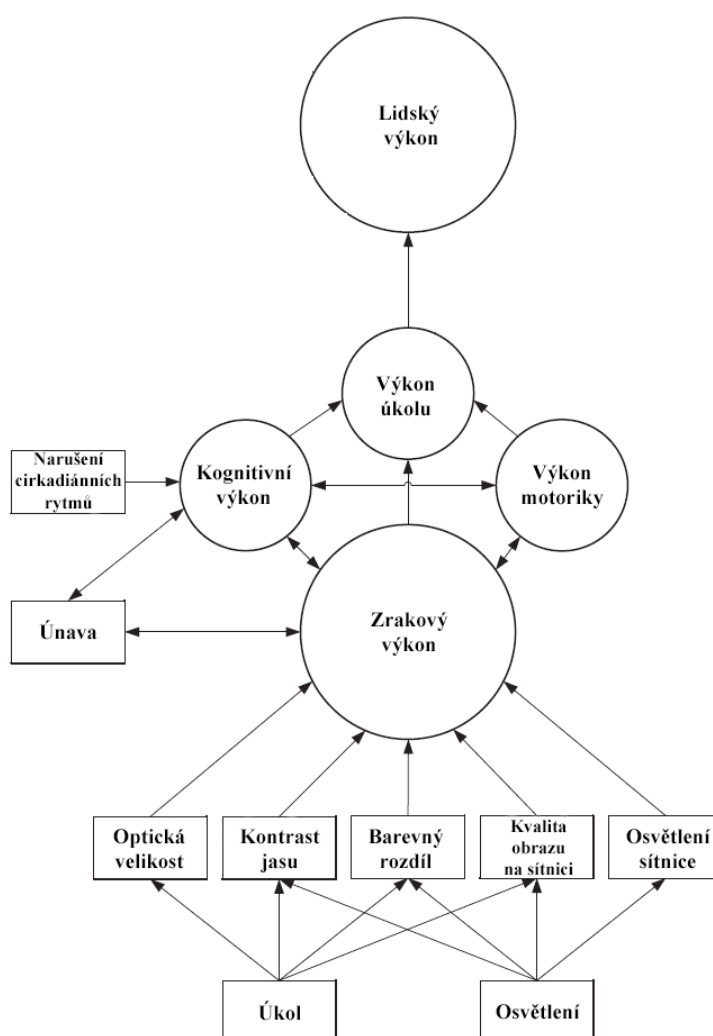
6. Důvody řízení osvětlovacích soustav

6.1 Fyziologické důvody

Přirozené světlo je světlo vyzařované sluncem přímo, nebo po odrazu od měsíce. Hlavní charakteristikou přirozeného světla je jeho proměnlivost, přirozené světlo se mění ve velikosti, spektrálním obsahu a distribuci při různých meteorologických podmínkách, různých časech, dnech v roce a různých zeměpisných šířkách.

Hlavním důvodem pro řízení osvětlovacích soustav je zejména přiblížit umělé osvětlení co nejvíce dynamice přirozeného světla.

Světlo je pro člověka hlavně prostředkem k získání a přenosu informací o prostředí, ve kterém se nachází. Aby člověk mohl správně přijímat a zpracovávat informace s dostatečnou rychlostí, bez zkreslení a nadbytečné námahy, musí se osvětlení přizpůsobit patřičné zrakové činnosti.



Obr. 24 Vykreslení závislosti lidského výkonu na osvětlení [34]

Kontrast jasu:

Kontrast jasu vyjadřuje jas podnětu ve vztahu k pozadí. Čím vyšší je kontrast jasu, tím snazší je detekovat podnět. Špatně nastavené osvětlení může také změnit světelný kontrast podnětu změnou jasu jeho částí a tím zapříčinit oslnění.

Barevný rozdíl:

Jas definuje množství světla emitovaného z podnětu, ale ignoruje kombinaci vlnových délek tvořících toto světlo. Jedná se o vlnové délky, které ovlivňují barevný vzhled podnětu. Je možné mít podnět s nulovým kontrastem jasu, který bude stále detekovatelný, protože se bude barevně odlišovat od barvy pozadí. Osvětlení může měnit barevný rozdíl mezi podnětem a jeho pozadím při použití světelných zdrojů s různými spektry.

Kvalita obrazu v sítnici:

Jako u všech systému pro zpracování obrazu, vizuální systém pracuje nejlépe, když pracuje s ostrým obrazem. Ostrost obrazu v sítnici je dána samotným podnětem a do jaké míry bude světlo rozptýleno pro průchodu různými prostředními. Osvětlení může udělat jen málo pro změnu některého z těchto faktorů, ačkoliv se prokázalo, že světelné zdroje, které emitují velké množství světla s krátkými vlnovými délkami, snižují velikost čočky v oku (snižují námahu očních svalů) více, než světla, které obsahují menší množství krátkých vlnových délek při stejné svítivosti.

Osvětlení sítnice:

Osvětlení sítnice určuje, v jakém stavu bude adaptace vizuálního systému. Při vyšším jasu se čočka zúží, při nižším jasu se čočka rozšíří. [34]

6.1.1 Dopad osvětlení na lidský organismus

Světelné podmínky mohou ovlivnit výkon úkolu třemi způsoby: účinkem na vizuální systém, cirkadiánní časovací systém a změnou nálady a motivace.

Dopad světelných podmínek na vizuální systém, a tedy i na vizuální výkon je určen velikostí, světelným kontrastem a barevným rozdílem úkolů a také velikostí, spektrem a rozložením osvětlení.

Účinek osvětlení na cirkadiánní rytmus je dán množstvím, spektrem, časováním a dobou vystavení světlu. [34]

Cirkadiánní rytmus je proces v těle, který se u člověka vyvíjel po celou dobu jeho existence. Je to biologický proces, který je zodpovědný za načasování všech biologických procesů v závislosti na denní době. Cirkadiánní rytmy ovlivňují spánkové cykly, pozornost, tvorbu hormonů, stravovací návyky a trávení, tělesnou teplotu, regeneraci buněk a další důležité tělesné funkce. Bylo zjištěno, že nepravidelné biologické rytmy mohou zapříčinit chronické zdravotní potíže, jako například poruchu spánku, obezitu, cukrovku, depresi, bipolární poruchu a sezónní afektivní poruchu (S.A.D.). Mezi jedny z nejdůležitějších hormonů ovlivněných cirkadiánním rytmem jsou melatonin a cortisol. **Melatonin** chystá tělo na spánek, tím že navozuje ospalost a snižuje tělesnou teplotu. **Cortisol** zajišťuje tvorbu glukózy, kterou mozek používá jako zdroj energie, dále pak zajišťuje správnou funkci

antistresových a protizánětlivých procesů v těle. [35] [36]

Lidé mívají při práci na noční směně často potíže s prováděním mnoha druhů úkolu, neboť jejich cirkadiální rytmus jim říká, že tou dobou již mají spát. Organismus se na tyto nepřírozené spánkové cykly nikdy plně neadaptuje, a z dlouhodobého hlediska může dojít k vážné dysbalanci biologických procesů. Existují dva přístupy k snížení těchto obtíží. První je kontrolované vystavení světlu, které zajistí posun fáze cirkadiálního rytmu tak, aby doba bdění odpovídala době, kdy má být práce provedena. To je v zásadě možné, ale v praxi málo používané, protože efektivní expozice světla musí být prováděna po dobu 24 hodin. Druhým způsobem je vystavení světlu, které sníží tvorbu hormonu melatoninu, a tím zvýšení bdělosti v noci, což může vést k snížení pracovního vypětí.

Vliv osvětlení na náladu a motivaci je dán zejména teplotou světla daného osvětlení. [34]

6.2 Ekonomické a ekologické důvody

Neméně podstatnými důvody pro řízení osvětlovacích soustav je také snížení ekonomického a ekologického zatížení.

Elektřina je rafinované palivo, které je nákladné vyrábět, distribuovat a uchovávat. Generování elektřiny často zahrnuje spalování fosilních paliv, které způsobují nadměrné vypouštění oxidu uhličitého do atmosféry. Odhaduje se, že spotřeba elektrické energie využívané na osvětlení v česku činí cca 7 % [37] a celosvětově cca 19 %. Spotřeba elektrické energie na osvětlení je jedna z položek, která se dá výrazně snížit, neboť již existují energeticky účinné technologie, které zatím nejsou široce využívány. Snížení elektrické energie se dá zajistit vhodným doporučením používání, konstrukcí a regulací (řízením).

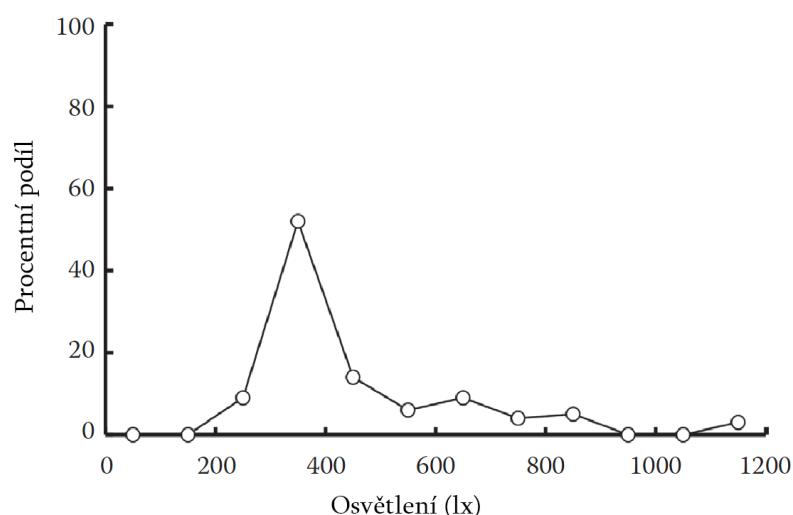
V roce 2003 byla provedena studie v Anglii, kde byly 2 roky monitorovány 4 budovy s kanceláři. Kanceláře byly otevřené a osvětlení se skládalo z denního světla a ze zapuštěných svítidel se zářivkami, jednotlivá svítidla byla řízena skupinkami lidí o velikosti od 1 do 9. Každá skupinka sedící pod svítidlem jej mohla stmívat nebo vypínat pomocí ručního vysílače, nástěnného vypínače nebo pomocí telefonu. Celková spotřeba elektrické energie se snížila o 39 % - 74 %. [34]

V roce 2007 byla provedena studie v Kanadě, kde ve 12 patrové budově bylo provedeno měření na 4 podlažích po dobu 1 roku. Jednalo se o kanceláře, kde každé pracoviště bylo osvětleno svítidlem se zářivkou, senzorem přítomnosti osob, světelným senzorem a vše bylo připojeno do centrálního ovládacího počítače. Svítidlo bylo tedy řízeno třemi různými způsoby, senzor přítomnosti osob zajistil, že pokud bylo pracoviště prázdné, tak svítidlo bylo stmíváno až do jeho vypnutí, pokud byla detekována přítomnost osoby, tak se svítidlo okamžitě rozsvítilo do původně nastavené velikosti osvětlení nastavené danou osobou. Přítomnost denního osvětlení byla monitorována světelným senzorem, který poté stmíval svítidla do 50 % jejich světelného výkonu, při dostatečném denním světle. Tento limit 50 % limit mohl být přenastaven individuálním nastavením každého pracovníka. Záznamy dat se rozdělovaly do třech fází. V první fázi bylo řízení svítidel limitováno na řízení senzorem přítomnosti a individuálním nastavením. V druhé fázi fungovaly všechny tři řídicí systémy. V třetí fázi bylo navíc pracovníkům připomínáno, ať se snaží šetřit elektrickou energií.

Tab. 4 Průměrná procentní hodnota úspory energie při použití různých systémů řízení osvětlení [34]

Řídicí systém	Energetické úspory [%]		
	První fáze	Druhá fáze	Třetí fáze
Senzor přítomnosti	29	35	38
Individuální řízení	20	11	5
Světelný senzor	-	20	11
Senzor přítomnosti + individuální řízení	40	40	39
Senzor přítomnosti + světelný senzor	-	45	44
Individuální řízení + světelný senzor	-	24	14
Všechny tři řídicí systémy zároveň	39	47	42

Zjistilo se, že individuální řízení není důležité pro to, aby lidé mohli neustále měnit jejich intenzitu osvětlení, ale že existují velké rozdíly v individuálních preferencích na osvětlení.



Obr. 25 Procentní podíl pracovníků pracujících při různé intenzitě osvětlení [34]

Po dobu experimentu se osvětlení pracoviště průměrně pohybovalo od 275 do 1075 lx. Z výsledků měření je patrné, že individuální řízení osvětlení není přínosné pouze z důvodu úspory elektrické energie. V rámci individuálního řízení si může pracovník rovněž upravit své vlastní pracovní prostředí, což má v důsledku pozitivní efekt na jeho celkovou spokojenost. [34]

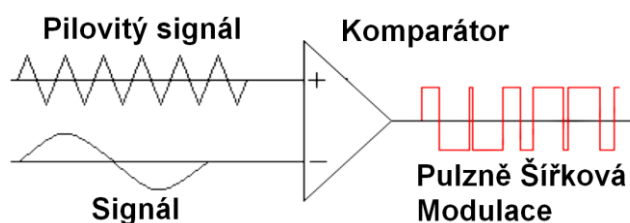
7. Možnosti řízení LED svítidel

K řízení LED se v dnešní době používají zejména dvě metody, **PWM** (Pulse Width Modulation) a **CCR** (Constant Current Reduction).

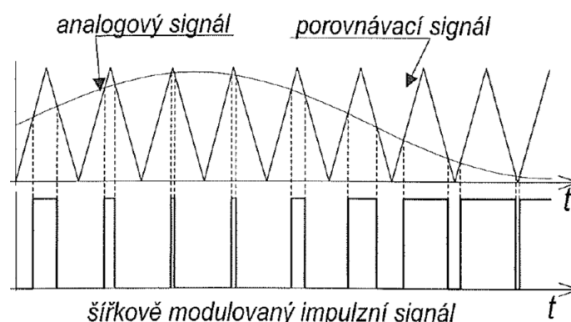
7.1 Metoda řízení PWM

Pulzní šířková modulace je ve své podstatě napájení zátěže obdélníkovými pulsy, které dovolí zapínání a vypínání zátěže vysokou rychlostí a lze tedy snížit celkové množství dodávané energie bez ztrát, které vznikají při omezení zdroje odporovými prvky.

Jeden z mnoha způsobů, jak můžeme vytvořit PWM, je použití pilovitého signálu a komparátoru, kde frekvence pilovitého signálu udává vzorkovací frekvenci vstupního signálu.



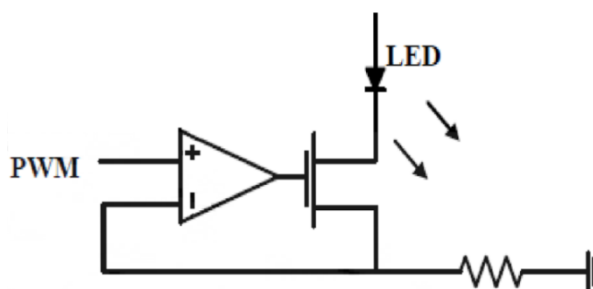
Obr. 26 Princip generování PWM [38]



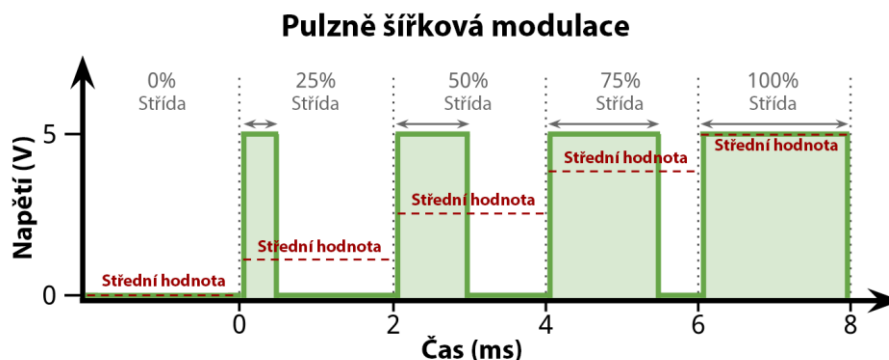
Obr. 27 Modulovaný PWM signál [39]

7.1.1 PWM stmívání LED diod

LED diody jsou řízeny pulzy se jmenovitou **konstantní amplitudou** proudu, kde **proměnná je šířka pulzů** (střída), čímž se docílí požadovaná hodnota jasu. Dosáhneme-li dostatečně vysoké frekvence spínání (přibližně 200 Hz), tak oko díky jeho nedokonalosti nestíhá reagovat na tyto rychlé změny a vnímá vyzařované světlo jako jeho průměrnou hodnotu.



Obr. 28 Základní schéma zapojení PWM stmívání [38]



Obr. 29 Znáznornění střední hodnoty napětí v závislosti na hodnotě střída [40]

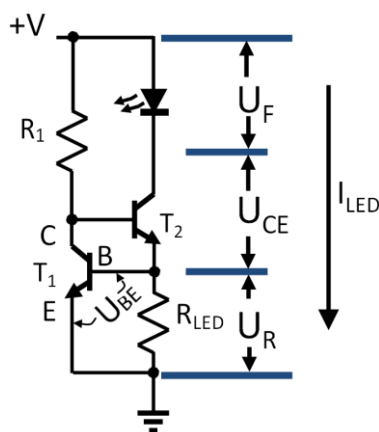
7.2 Metoda řízení CCR

CCR neboli Constant Current Reduction, je metoda řízení, při které je **snížována amplituda** dodávaného proudu do LED svítidla. Zdroje konstantního proudu lze rozdělit na **lineární** a **spínané**.

7.2.1 Lineární řídicí obvody

Zdaleka nejjednodušší metoda, jak limitovat proud dodávaný do LED je zapojení odporového prvku do série s LED. Jedná se ale o velmi nevhodné řešení, neboť úbytek napětí na odporu je vykoupěn přeměnou procházející elektrické energie na tepelnou energii.

Efektivnějším řešením je využití polovodičových prvků. Obvodů využívajících polovodičové prvky je nepřeberné množství, kde jedním ze základních zapojení je zapojení dvou NPN tranzistorů.



Obr. 30 Zdroj konstantního proudu zapojením dvou tranzistorů [41]

Princip:

Po zapojení zdroje napětí $+V$ se zapne tranzistor T_2 , protože do něj začne protékat bázev proud skrz odpor R_1 , poté co se tranzistor T_2 otevře, začne protékat proud I_{LED} skrz diodu, tranzistor T_2 a odpor R_{LED} , jakmile začne procházet odporem proud, vytvoří se na něm úbytek napětí U_R , po dosažení úbytku napětí $U_R = U_{BE} = 0,7 \text{ V}$, se začne otevírat tranzistor T_1 a proud tekoucí do báze tranzistoru T_2 se začne snižovat s narůstajícím proudem tekoucím do kolektoru tranzistoru T_1 , což má za následek omezení proudu I_{LED} .

Obvod tedy limituje velikost úbytku napětí na odporu R_{LED} , aby $U_{BE} \leq 0,7 \text{ V}$.

Odpor R_{LED} vypočteme z Ohmova zákona:

$$R_{LED} = \frac{0,7 V}{I_{LED}} \quad (1.8)$$

Ze vzorce je tedy zřejmé, že proud tekoucí LED diodou lze regulovat změnou odporu R_{LED} .

7.2.2 Spínané řídicí obvody

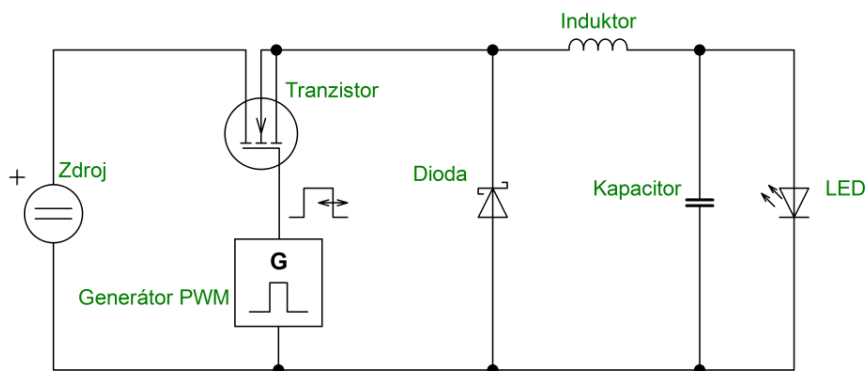
Výhoda spínaných řídicích obvodů je v jejich zvýšené účinnosti přeměny elektrické energie, která se může pohybovat až nad 90 %. V porovnání s lineárními regulačními obvody, jsou spínané regulační obvody komplexnější a dražší.

Spínané zdroje lze rozdělit na čtyři kategorie → Buck, Boost, Buck-Boost a zpětnovazební (flyback).

Buck – Nižší napětí na výstupu než na vstupu

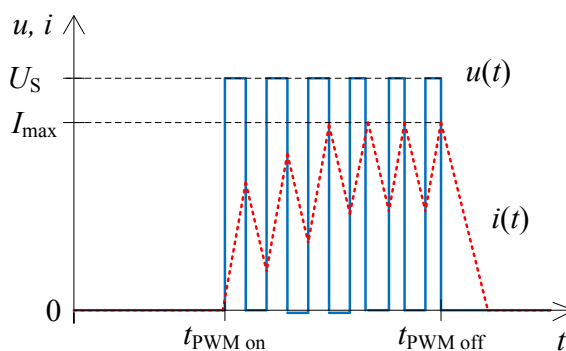
Boost – Vyšší napětí na výstupu než na vstupu

Jednotlivé druhy se liší zapojením jednotlivých součástek.



Obr. 31 Obvodové schéma spínaného zdroje typu Buck

Spínaný řídicí obvod použije energii do obvodu v krátkých impulsech, kdy tranzistor se zapojeným kontrolérem generujícím PWM určuje rychlost, jakou bude tranzistor spínán. V obvodu se dále nachází indukční prvek, který se při sepnutém tranzistoru nabíjí (uchovává energii ve formě magnetického pole) a při vypnutí tranzistoru vybíjí, využívá se tedy jevu, kdy se proud na induktoru nemůže měnit skokově. Při vhodné zvolené rychlosti spínání tranzistoru lze dosáhnout průběhu proudu, který je téměř konstantní.



Obr. 32 Průběh proudu na induktoru

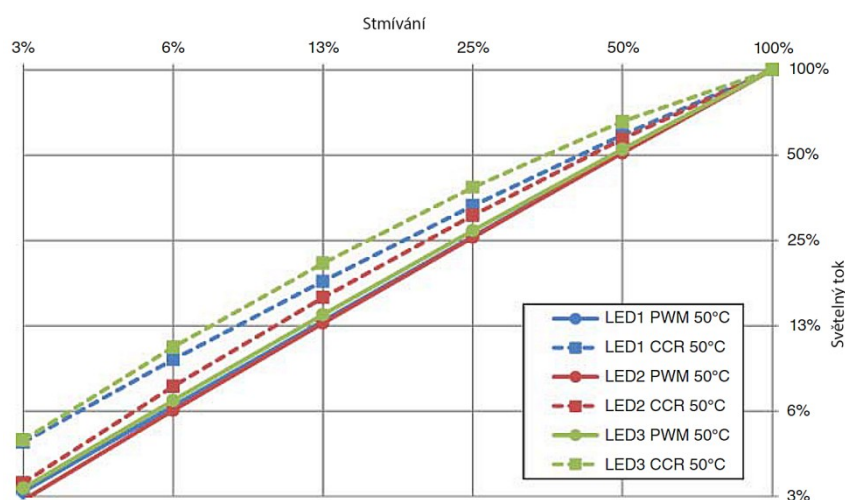
7.3 Rozdíly mezi jednotlivými metodami řízení

Pro porovnání jednotlivých metod byl proveden test tří druhů bílých LED pracujících při svém nominálním proudu.

LED1 – Druh bílé LED používané v automobilovém průmyslu k dennímu svícení.

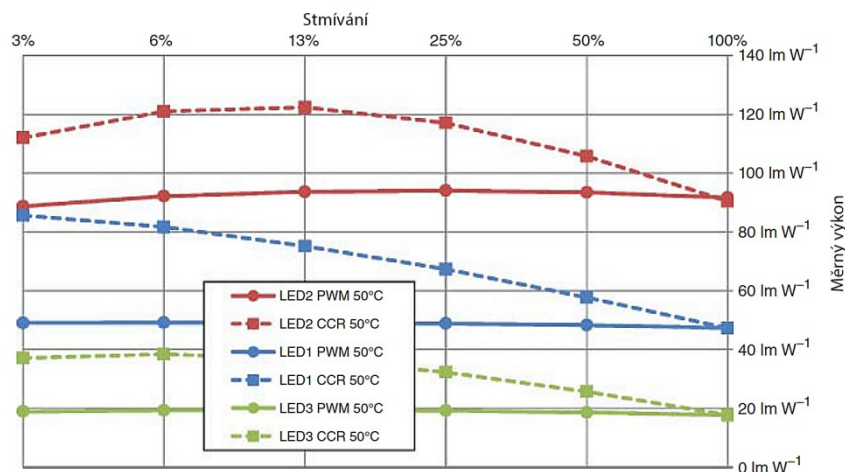
LED2 – Druh bílé LED používané v interiérových osvětlovacích systémech.

LED3 – Druh bílé LED používané v automobilovém průmyslu v předních světlometech.



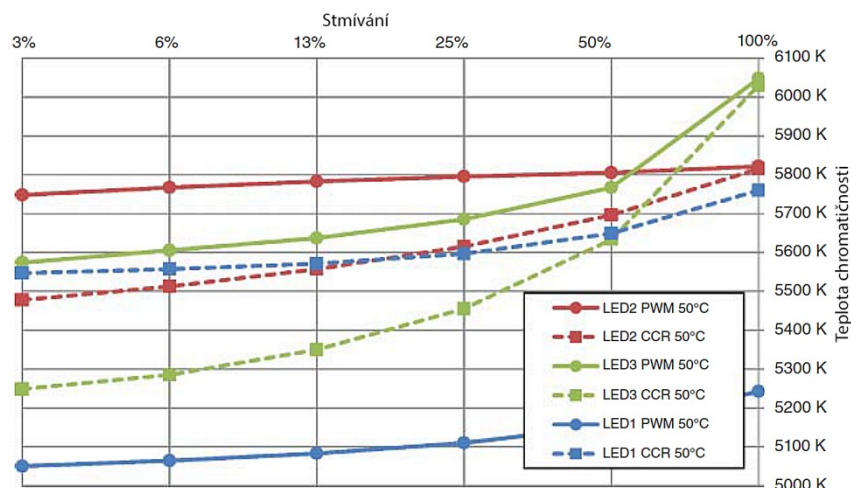
Obr. 33 Porovnání linearity stmívání bílých LED pro PWM a CCR metodu [42]

Porovnáním výsledků testu linearity stmívání lze pozorovat lineární průběh při použití metody PWM a mírně zakřivený průběh při použití CCR metody, neboť při ní dochází ke snižování amplitudy proudu (světelný tok diody není lineárně závislý na procházejícím proudu).



Obr. 34 Porovnání měrné účinnosti v závislosti na stínění pro CCR a PWM metodu [42]

Použitím metody PWM je při konstantní amplitudě proudu a napětí konstantní i dodávaný výkon, což zapříčiní i konstantní hodnotu měrného výkonu. V případě CCR metody je velikost proudu snižována, což vede k snížení proudové hustoty na P-N přechodu, čímž se zvýší účinnost rekombinace mezi elektrony a děrami a zvýší se tak počet světelných přechodů, snížením proudu se tedy zvýší měrný výkon LED.



Obr. 35 Porovnání změny teploty chromatičnosti v závislosti na stmívání pro CCR a PWM metodu [42]

Z grafu na **Obr. 30** je patrné, že změna teploty chromatičnosti je závislá jednak na použité řídicí metodě, ale také na druhu použité LED.

Pro LED1 lze pozorovat stejný průběh pro obě použité metody.

Pro LED2 používanou ve vnitřních osvětlovacích soustavách se teplota chromatičnosti změnila o 60 K při použití PWM a o 340 K při použití CCR metody.

U LED3 došlo při řízení pomocí PWM ke snížení teploty chromatičnosti o 470 K a o 800 K při použití metody CCR.

Při použití metody PWM je amplituda proudu konstantní, předpokládá se tedy, že také teplota chromatičnosti by měla zůstat nezměněna, ale s proměnnou šířkou pulsu se mění generované a vyzářené teplo z polovodiče a tím pádem také teplota ochuzené vrstvy přechodu P-N. [42]

8. Experimentální měření účinnosti LED driveru

8.1 Napájecí zdroj

Napájení řídicího obvodu poskytuje spínaný AC/DC zdroj **IRM-45-48ST** s výkonem 45 W a výstupním napětím 48 V. Výrobce udává účinnost je 90,5 %. [43]



Obr. 36 Napájecí zdroj IRM-45-48ST

8.2 Řídicí obvod

Řídicí obvod se skládá ze dvou částí, kde hlavním komponentem je mikroprocesor **EFM8BB21F16**, který bude dle nahranych řídicích charakteristik působit pomocí PWM signálu na dva stmívací obvody řízené čipem **ILD6150** firmy Infineon.

ILD6150 je zdroj typu **Buck** schopný pracovat s napájecím napětím od 4,5 V do 60 V při průměrném výstupním proudu 1,5 A. Výhodou zdroje je schopnost řízení LED jak pomocí analogového stmívání, tak také pomocí externího zdroje PWM signálu.

Při analogovém stmívání se vstupní stejnosměrné řídicí napětí konvertuje pomocí interní logiky na PWM signál o frekvenci 1,6 kHz, který moduluje výstupní proud.

Pro zmiňovaný obvod je udáváný lineární rozsah řídicího napětí od 0,5 V do 2,5 V. [44]

Hodnotu výstupního proudu lze nastavit pomocí sense rezistoru R_2 , jehož hodnotu je možno vypočítat pomocí rovnice:

$$I_{\text{výst}} = \frac{U_{\text{sense}}}{R_{\text{sense}}} = \frac{152 \text{ mV}}{R_{\text{sense}}} \quad (1.9)$$

Kde:

U_{sense} – Hodnota snímacího napětí, kde prahová hodnota činí 152 mV.

R_{sense} – Odpor snímacího rezistoru

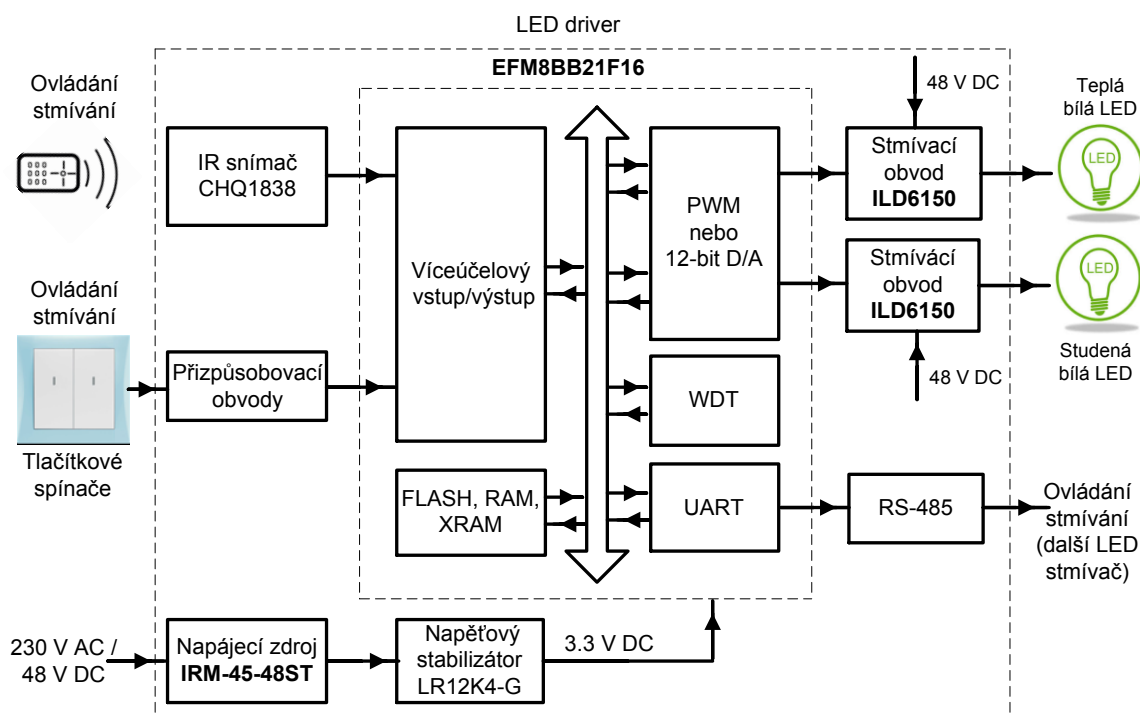
Sense, neboli snímací rezistor funguje jako převodník proudu na napětí, kdy ze známé hodnoty odporu a naměřeného úbytku napětí na odporu lze dopočítat pomocí Ohmova zákona procházející proud. Rezistor se volí s co nejmenší hodnotou odporu pro omezení nadbytečných ztrát, které by snižovaly účinnost celého obvodu.

Pro experimentální měření byla zvolena hodnota odporu $R_{\text{sense}} = 0,39 \, \Omega$, což odpovídá napájecímu proudu 390 mA.



Obr. 37 Řídicí obvod osazený čipem ILD6150 [44]

Na obrázku **Obr. 38** je pomocí blokového schéma přehledně znázorněno celkové zapojení řešeného obvodu, s šipkami vyznačujícími působení mezi jednotlivými částmi.



Obr. 38 Zjednodušené blokové schéma zapojení řešeného LED driveru

EFM8BB21F16 – Programovatelný mikrokontrolér, za pomoci kterého je možno ovládat stmívací obvody ILD6150. Mikrokontrolér rovněž zajišťuje sériovou komunikaci mezi periferiemi, vyhodnocuje signály z IR snímače a přizpůsobovacího obvodu.

UART – UART je hardwarový blok v mikrokontroléru zajišťující asynchronní sériovou komunikaci.

RS-485 – RS-485 je rozhraní umožňující propojení a vzájemnou sériovou komunikaci dvou zařízení.

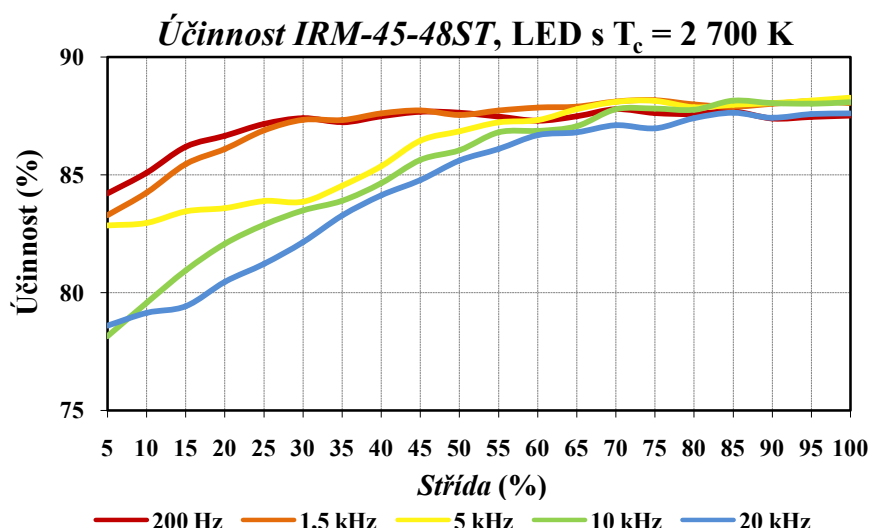
WDT – Watchdog Timer má za úkol resetovat celý obvod při jeho zacyklení.

Přizpůsobovací obvod – Přizpůsobovací obvod plní funkci napěťového přizpůsobení, kdy ze střídavého napětí 230 V vytváří pomocí optočlenů a jiných přizpůsobovacích prvků stejnosměrné napětí o velikosti 3,3 V, se kterým pak mikrokontrolér dokáže pracovat. Přizpůsobovací obvod plní rovněž funkci galvanického oddělení řídicího obvodu od sítě.

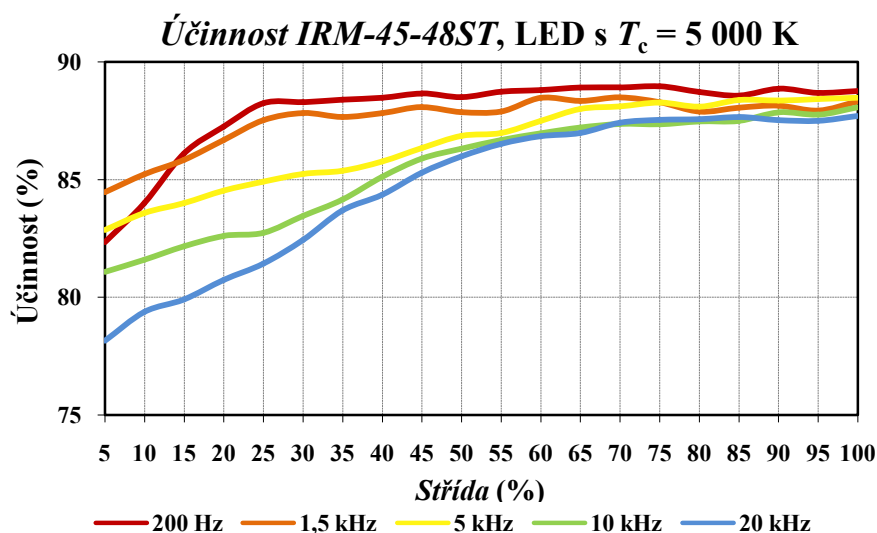
8.3 Naměřené křivky účinnosti

Měření bylo provedeno pomocí osciloskopu HMO3524, proudové sondy I-Prober 520, dvou multimetrů UT805 a generátoru funkcí MFG2140AF.

Osciloskop byl použit pro měření vstupu LED svítidla, pomocí multimetrů byl měřen vstup a výstup napájecího zdroje IRM-45-48ST a stmívacího obvodu ILD6150 a za pomoci funkčního generátoru byla nastavována střída generovaného signálu o příslušné frekvenci. Velikost střídy byla nastavována od 5 do 100 % s inkrementem po 5 %.



Obr. 39 Charakteristiky účinnosti IRM-45-48ST, napájené LED mají $T_c = 2700\text{ K}$ a $U_f = 3,16\text{ V}$

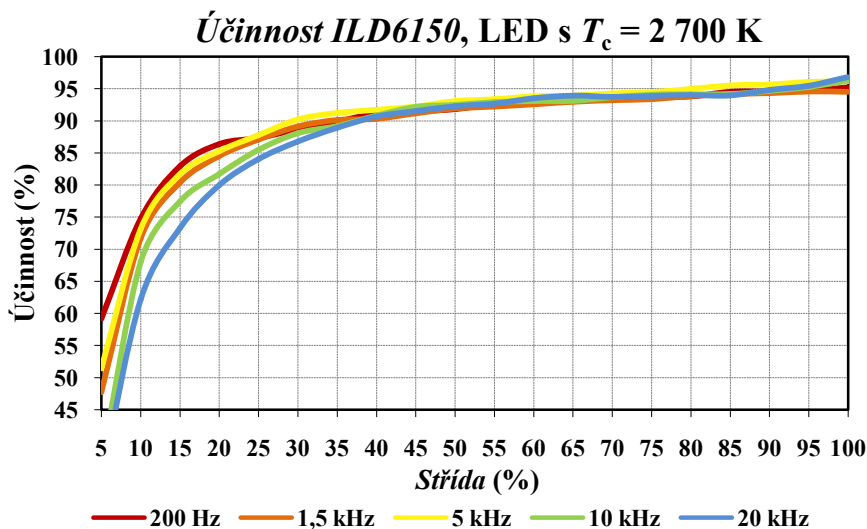


Obr. 40 Charakteristiky účinnosti IRM-45-48ST, napájené LED mají $T_c = 5000\text{ K}$ a $U_f = 3,16\text{ V}$

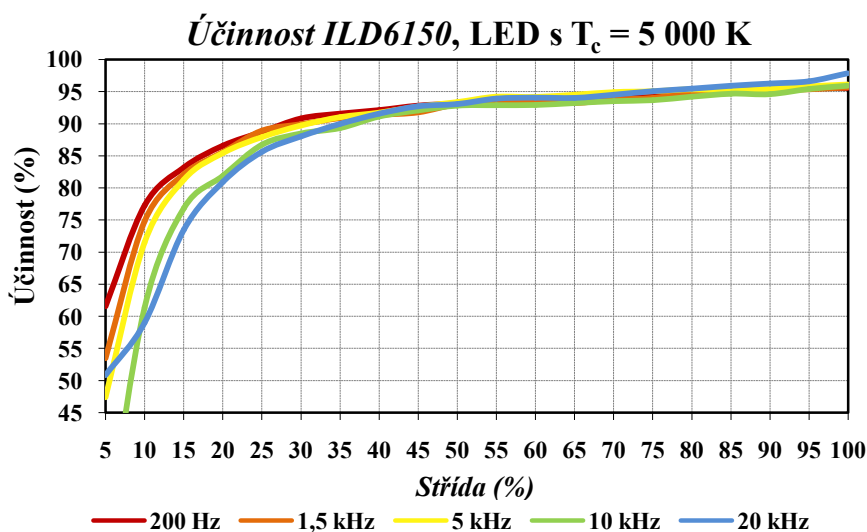
Z naměřených charakteristik je zřejmé, že zdroj dosahuje vysoké účinnosti v celém stmívacím intervalu. Zdroj si udržuje téměř konstantní hodnotu účinnosti a k většímu snížení dochází až po snížení střídy o 75 % pro frekvence 200 a 1500 Hz. Pro frekvence od 5 kHz a výše dochází

k výraznějšímu snížení účinnosti již od střídy 50 %.

Porovnáním jednotlivých charakteristik lze pozorovat nepatrné rozdíly mezi účinností zdroje při napájení teplé a při napájení studené LED, které jsou zapříčiněny zejména rozdílnými parametry jednotlivých diod.

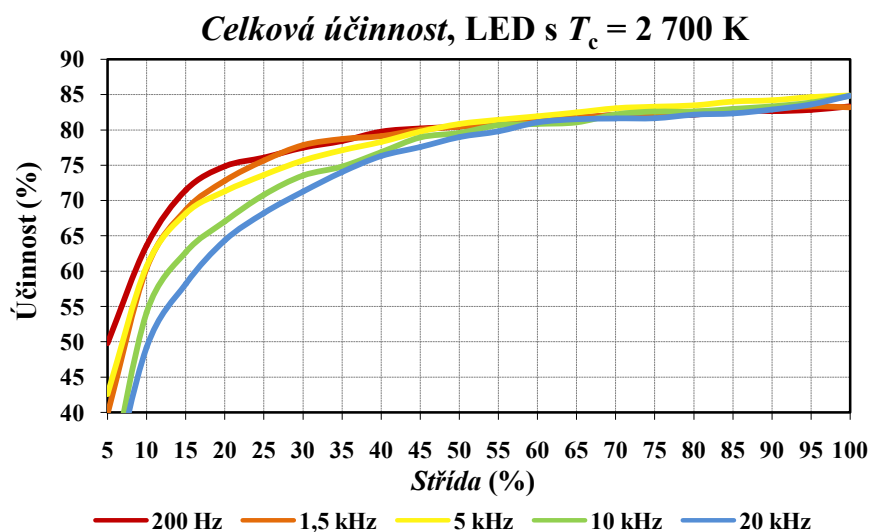


Obr. 41 Charakteristiky účinnosti ILD6150, napájené LED mají $T_c = 2\,700\text{ K}$ a $U_f = 3,16\text{ V}$

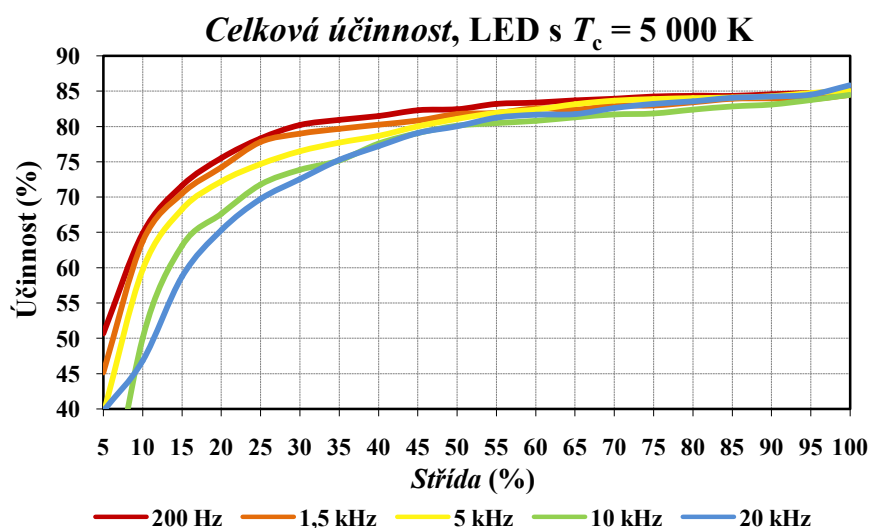


Obr. 42 Charakteristiky účinnosti ILD6150, napájené LED mají $T_c = 5\,000\text{ K}$ a $U_f = 3,16\text{ V}$

Na **Obr. 41** a **Obr. 42** lze pozorovat, že při vyšších hodnotách střídy dosahuje hodnota účinnosti stmívacího obvodu až 96 %. Velikost účinnosti zůstává po dobu stmívání téměř konstantní až do hodnoty střídy 30 %, poté dochází k strmějšímu poklesu. Jako v případě měření účinnosti napájecího zdroje, i zde můžeme pozorovat mírné rozdíly v průbězích účinnosti při napájení teplé a studené bílé LED.

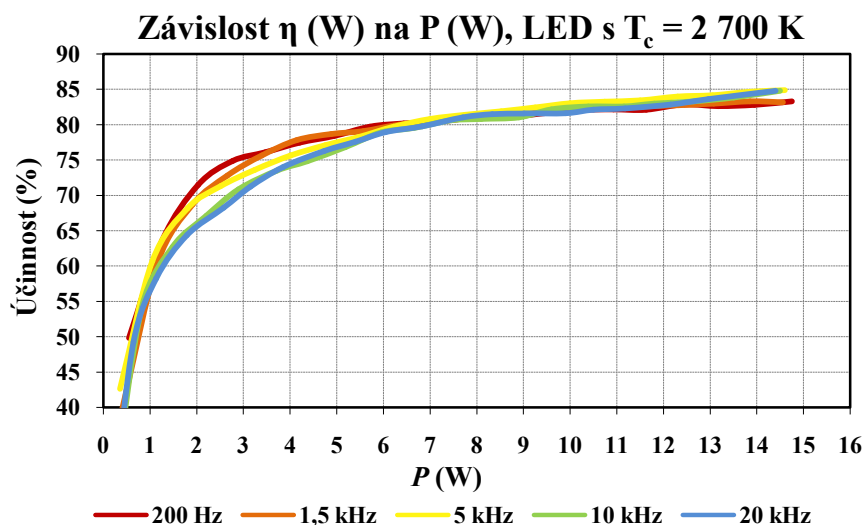


Obr. 43 Charakteristiky celkové účinnosti, napájené LED mají $T_c = 2\,700\text{ K}$ a $U_f = 3,16\text{ V}$

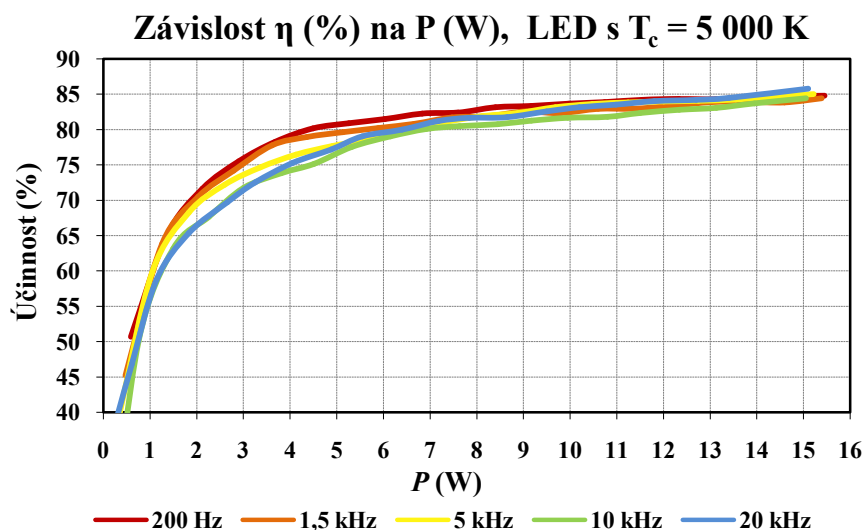


Obr. 44 Charakteristiky celkové účinnosti, napájené LED mají $T_c = 5\,000\text{ K}$ a $U_f = 3,16\text{ V}$

Porovnáním jednotlivých charakteristik celkových účinností je zřejmé, že nejvyšších hodnot účinností v celém intervalu stmívání lze dosáhnout použitím nižších hodnot spínacích frekvencí. Zohledníme-li při výběru spínací frekvence také možnost výskytu flikru, tak se jako nejideálnější hodnota z naměřených průběhů jeví spínací frekvence okolo **1,5 kHz**, kombinující dobrou účinnost v celém stmívacím rozsahu a zároveň nízkým výskytem flikru.



Obr. 45 Charakteristiky celkové účinnosti v závislosti na odebíraném výkonu, LED mají $T_c = 2\,700\text{ K}$

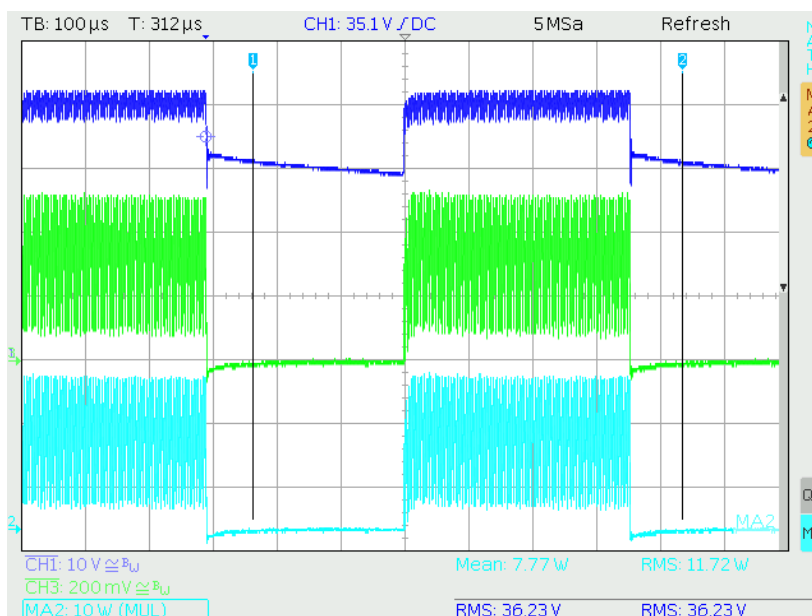


Obr. 46 Charakteristiky celkové účinnosti v závislosti na odebíraném výkonu, LED mají $T_c = 5\,000\text{ K}$

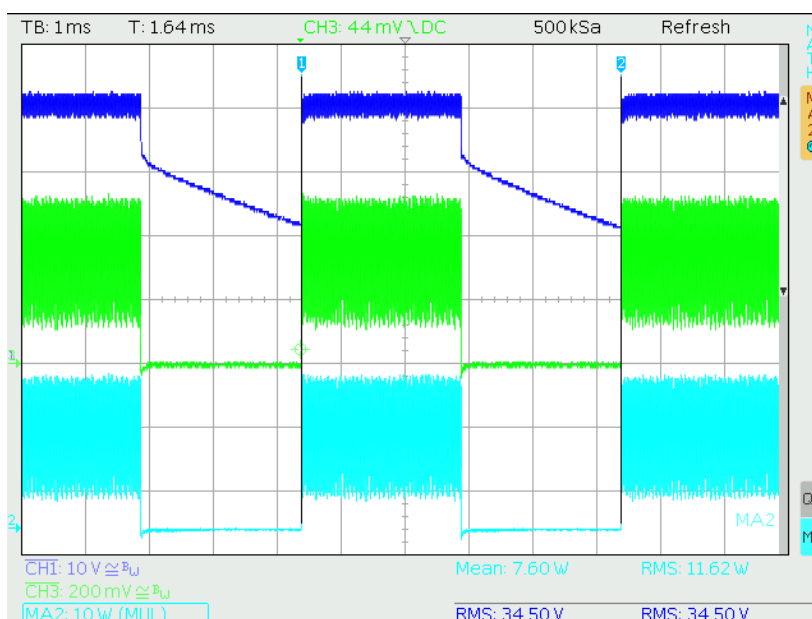
Z průběhů závislosti celkové účinnosti na odebíraném výkonu můžeme pozorovat, jak se s velikostí odebíraného výkonu mění účinnost napájecího obvodu. Z průběhů můžeme vidět, že k výraznějšímu poklesu účinnosti LED driveru dochází při poklesu odebíraného výkonu pod 5 W, kde účinnost klesá až na hodnotu menší než 40%. Dá se předpokládat, že v běžném provozu bude svítidlo pracovat s výkonem od 5 W výše, kde účinnost řídicího obvodu dosahuje 77 % až 85 %.

8.4 Naměřené průběhy vstupních veličin pro analogové a PWM řízení

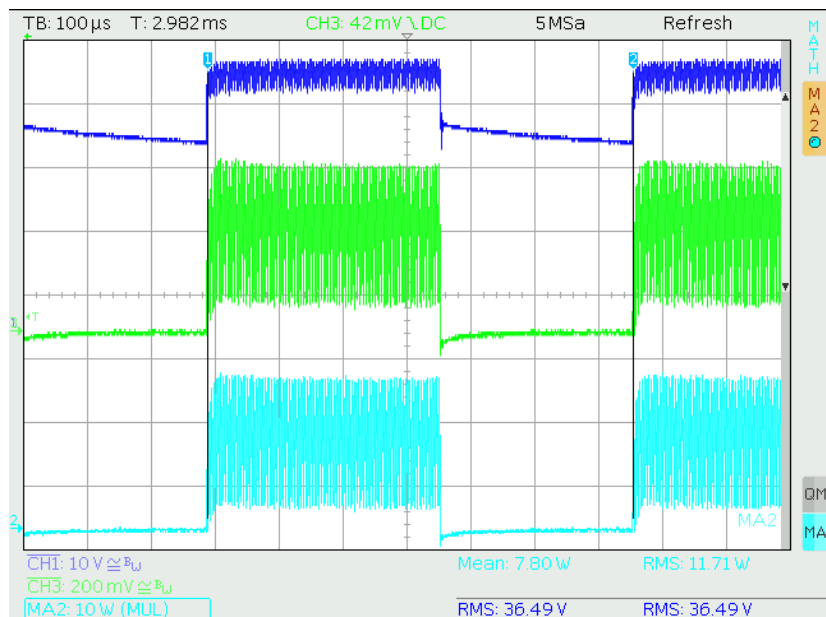
Následující průběhy byly vyexportovány z osciloskopu HMO3524 a vyobrazují průběh napětí na kanálu **CH1**, proudu na kanálu **CH3** a výkonu na matematickém kanálu **MA2**, na vstupu svítidla. Na průbězích je možno pozorovat princip činnosti spínaného zdroje schopného měnit velikost dodávaného výkonu pomocí PWM. Na průbězích, kde dochází ke spínání při vyšších frekvencích je možno pozorovat dvojí druh spínání, a to spínání, které zaručuje konstantní velikost proudu (nastavenou pomocí sense odporu, viz kapitola 8.2) a PWM spínání, pomocí kterého měníme velikost dodávaného výkonu.



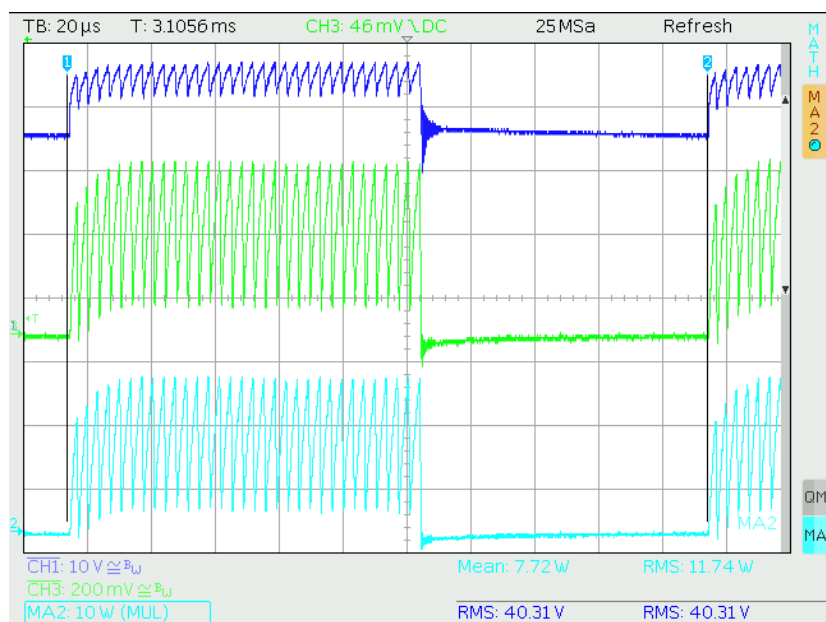
Obr. 47 Analogové řízení: $f_{PWM} = 1,6 \text{ kHz}$, $U_{DA} = 1.6 \text{ V}$, $P = 7,77 \text{ W}$



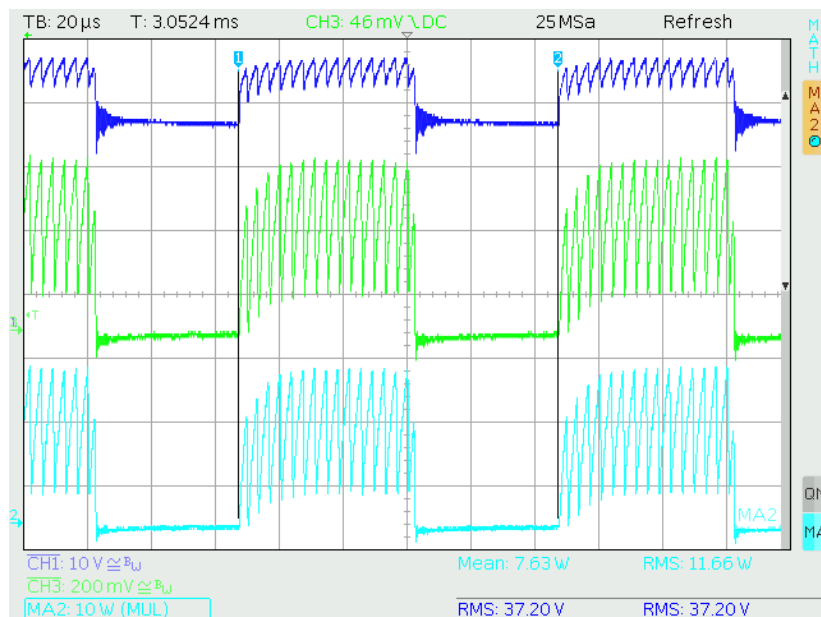
Obr. 48 PWM řízení: $f_{PWM} = 200 \text{ Hz}$, $střida = 50 \%$, $P = 7,60 \text{ W}$



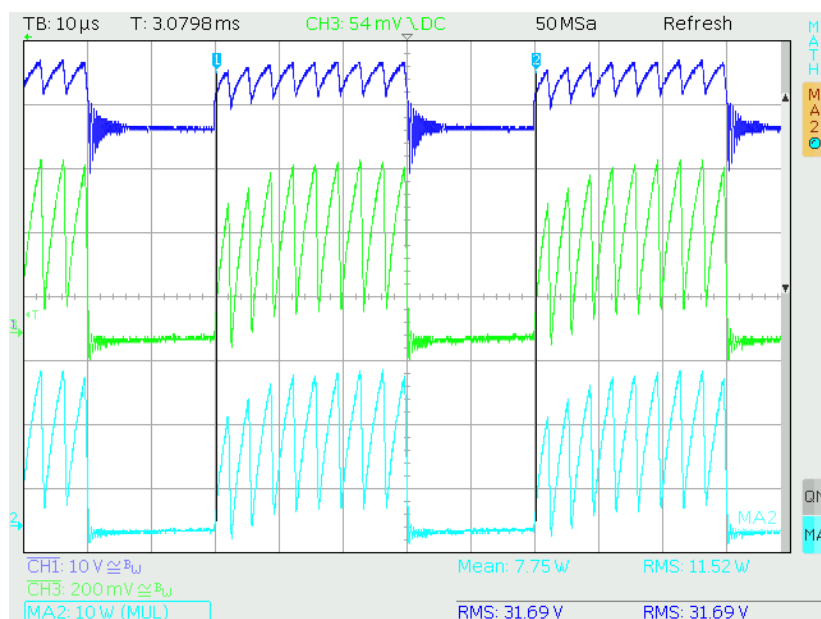
Obr. 49 PWM řízení: $f_{\text{PWM}} = 1.5 \text{ kHz}$, $\text{střída} = 55 \%$, $P = 7,80 \text{ W}$



Obr. 50 PWM řízení: $f_{\text{PWM}} = 5 \text{ kHz}$, $\text{střída} = 55 \%$, $P = 7,72 \text{ W}$



Obr. 51 PWM řízení: $f_{\text{PWM}} = 10 \text{ kHz}$, $\text{střída} = 55 \%$, $P = 7,63 \text{ W}$



Obr. 52 PWM řízení: $f_{\text{PWM}} = 20 \text{ kHz}$, $\text{střída} = 60 \%$, $P = 7,75 \text{ W}$

Porovnáním průběhů lze pozorovat, jak se zvyšující se spínací frekvencí klesá dodávaný výkon do svítidla. K tomuto poklesu výkonu dochází, neboť proud se na induktoru nemůže měnit skokově, při sepnutí dochází k postupnému nabíjení induktoru na jmenovitou hodnotu proudu a při vyšších spínacích frekvencích je doba, kdy je LED napájena jmenovitou hodnotou proudu nižší a tedy i střední hodnota výkonu je nižší.

Pro zachování konstantního dodávaného výkonu je proto zapotřebí zvýšit velikost střidy a tím výkonový rozdíl dorovnat. Při měření spínací frekvence 200 Hz byl při střídě 50 % dodávaný výkon 7,6 W, pro zachování stejné velikosti výkonu při spínací frekvenci 20 kHz bylo zapotřebí zvýšit střidu o 10 %.

9. Experimentální měření parametrů svítidla při různých spínacích frekvencích

Pro měření světelných parametrů svítidla, bylo využito kulového integrátoru a spektrofotometru Jeti specbos 1211.

Kulový integrátor – Jedná se o dutou kouli, která má z vnitřní strany speciální nátěr, jedná se o bílou barvu vykazující vysokou odrazivost, vysoký rozptyl a barevnou neselektivitu.

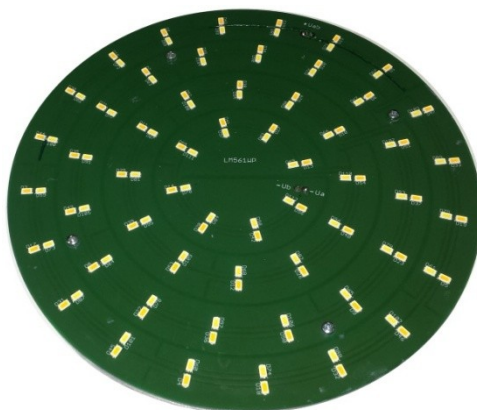
Kulový integrátor pracuje na principu mnohonásobných odrazů, ke kterým dochází uvnitř koule. Těmito mnohonásobnými odrazy se osvětlí též okénko, ve kterém se nachází měřicí přístroj. Osvětlenost je pak přímo úměrná toku světelného zdroje.

Měření bylo také příkon svítidla pomocí wattmetru umístěného na vstupu napájecího zdroje.

9.1 Měření svítidla

LED panel měřeného svítidla obsahuje 112 LED diod, z toho 56 LED má náhradní teplotu chromatičnosti 2700 K a zbylých 56 LED má náhradní teplotu chromatičnosti 5000 K. Oba typy LED diod jsou zapojeny do sérioparalelní konfigurace, kdy je 4x paralelně zapojeno v sérii 14 LED diod. Použity byly LED diody typu LM561B firmy Samsung. LED diody obsahují zenerovu diodu jako ochranný prvek proti přepólování.

Napájecí proud byl pomocí R_{sense} rezistoru nastaven na 390 mA. Proud tekoucí jednotlivými LED diodami tak činil 97,5 mA, což odpovídá 146 % jmenovitého světelného toku.



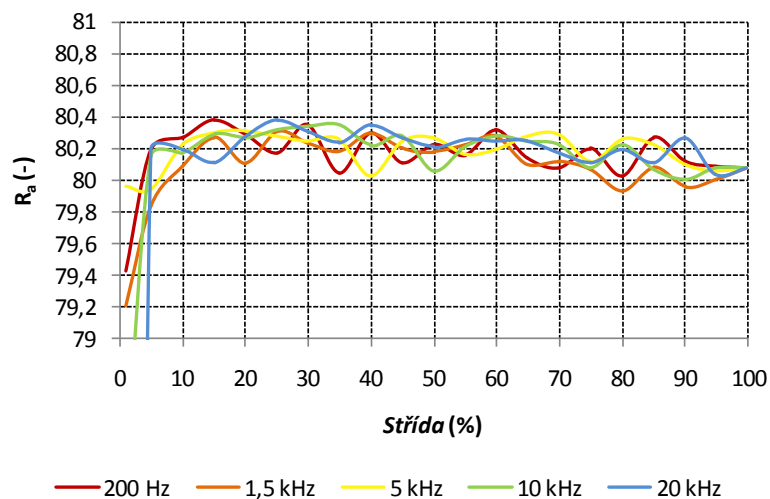
Obr. 53 Umístění LED diod na tištěném spoji opatřeném kovovou chladicí plochou

Tab. 5 Tabulka parametrů použitých LED [45]

	Teplá LED	Studená LED
T_c (K)	2 700	5 000
R_a (-)	min. 80	min. 80
Φ (lm), při I_{Fn}	30 – 32	33 – 35
P (W)	0,3	0,3
I_{Fmax} (mA)	180	180
T_p (°C)	-40 ~ +85	-40 ~ +85
I_{Fn} (mA)	65	65
U_R (V), při $I_R = 5$ mA	0,7 – 1,2	0,7 – 1,2
U_F (V)	3,1 – 3,2	3,1 – 3,2
η (lm/W)	151	166

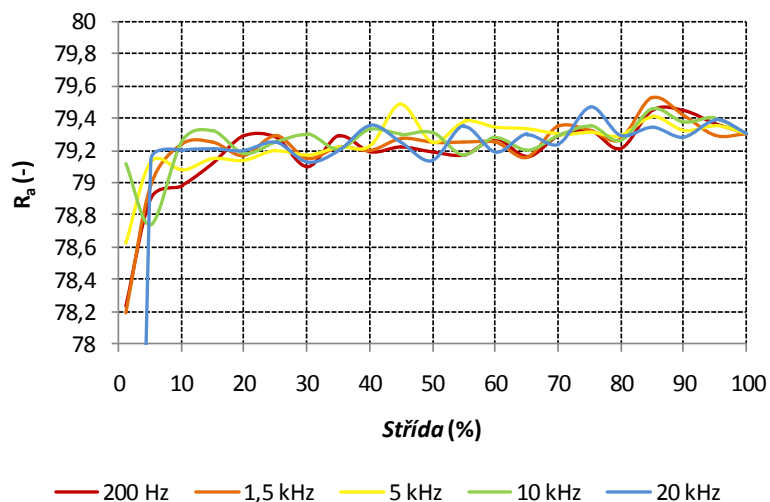
9.2 Naměřené charakteristiky

Závislost R_a indexu, LED s $T_c = 2\,700\text{ K}$



Obr. 54 Vykreslení závislosti R_a indexu na velikosti střída pro teplou LED

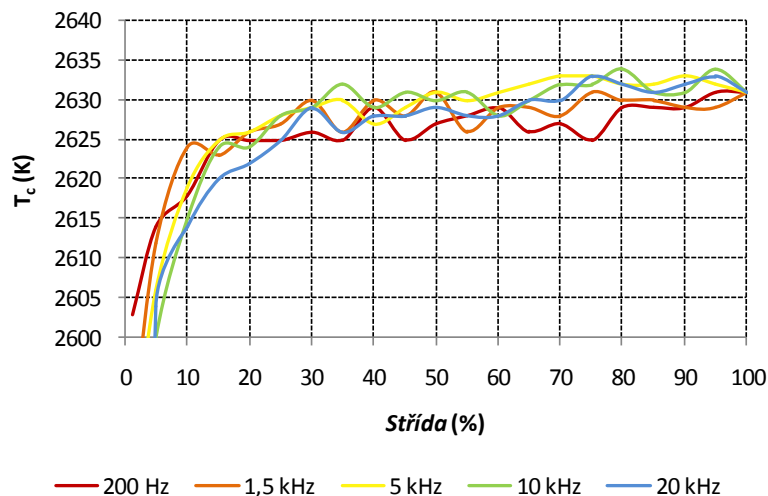
Závislost R_a indexu, LED s $T_c = 5\,000\text{ K}$



Obr. 55 Vykreslení závislosti R_a indexu na velikosti střída pro studenou LED

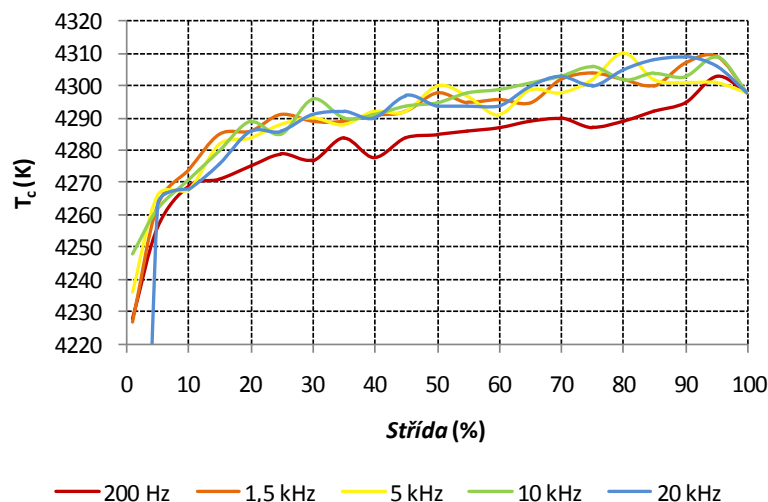
Z naměřených průběhů závislosti R_a indexu na velikosti střída je patrné, že R_a index se mění pouze nepatrně v závislosti na velikosti střída a použité spínací frekvenci. Vyšší pokles patrný při nižších hodnotách je způsoben nízkou hodnotou osvětlenosti, při které již spektrofotometr vykazuje nepřesnost.

Závislost T_c (K), LED s $T_c = 2\,700\text{ K}$



Obr. 56 Vykreslení závislosti náhradní teploty chromatičnosti na velikosti střídání pro teplou LED

Závislost T_c (K), LED s $T_c = 5\,000\text{ K}$



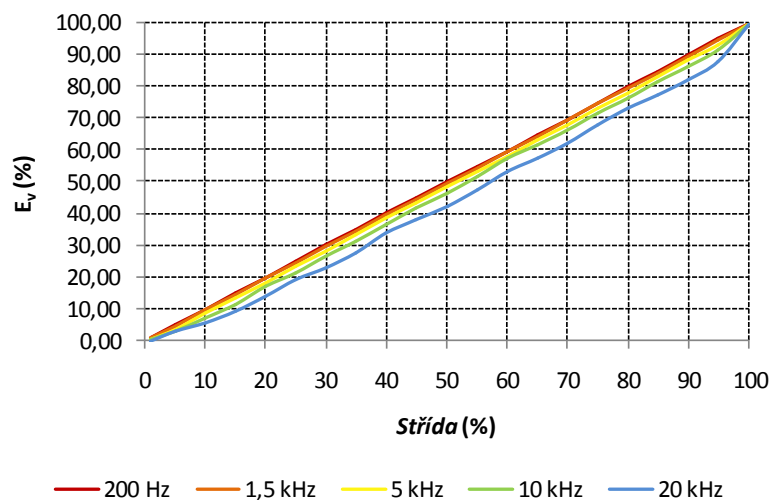
Obr. 57 Vykreslení závislosti náhradní teploty chromatičnosti na velikosti střídání pro studenou LED

Porovnáním jednotlivých grafů můžeme vidět, že oba druhy LED jsou kvalitně zpracované a náhradní teplota chromatičnosti se tak při změně střídání mění pouze minimálně. Z průběhů lze vyčíst, že náhradní teplota chromatičnosti teplé LED se mění pouze o cca 15 K a o cca 30 K u studené LED.

Při nízkých hodnotách střídání je opět patrný výraznější pokles způsobený výše zmíněnou nedostatečnou osvětleností. V obou grafech je také patrný rozdíl ve velikosti náhradní teploty chromatičnosti při napájení spínací frekvencí 200 Hz, tento pokles je způsoben nedostatečným zahřátím měřeného svítidla, neboť měření bylo prováděno jako první v pořadí.

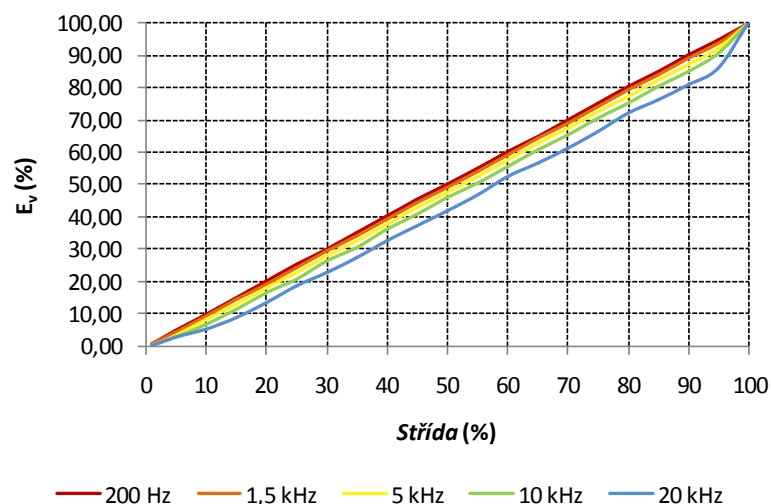
Z naměřených hodnot je patrné, že náhradní teplota chromatičnosti pro oba typy LED je výrazně nižší (teplejší), než hodnota udávaná výrobcem, bude tím pádem potřeba provést dodatečná měření, aby se vyloučil vliv kulového integrátoru na výsledky měření.

Závislost E_v (%), LED s $T_c = 2\,700\text{ K}$



Obr. 58 Vykreslení závislosti procentuální intenzity osvětlení na velikosti střidy pro teplou LED

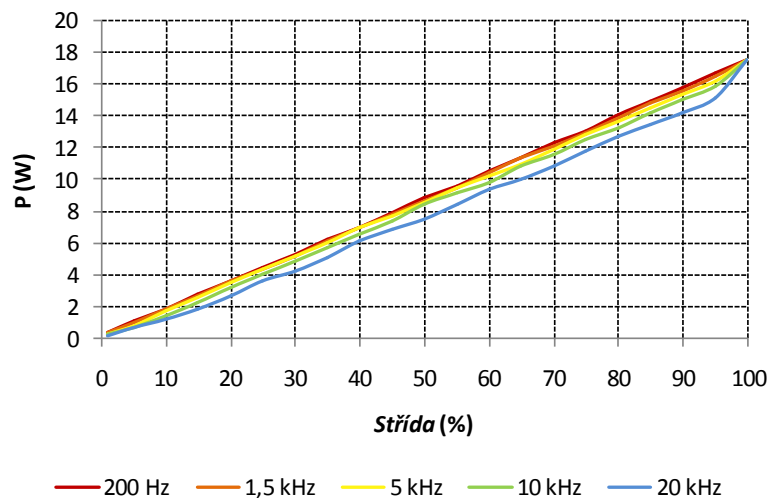
Závislost E_v (%), LED s $T_c = 5\,000\text{ K}$



Obr. 59 Vykreslení závislosti procentuální intenzity osvětlení na velikosti střidy pro studenou LED

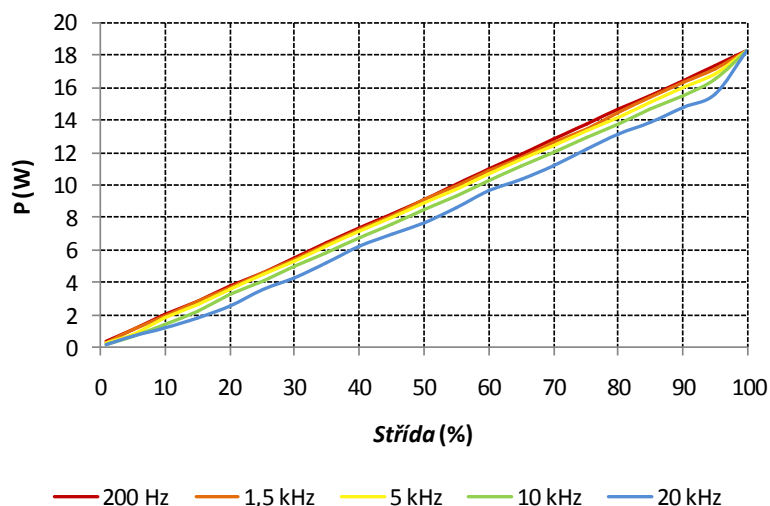
Z průběhů závislosti intenzity osvětlení na velikosti střidy je patrný již zmíněný pokles při vyšších frekvencích (viz kapitola 8.4), kdy je třeba pro stejnou velikost intenzity osvětlení zvýšit hodnotu střidy. Velikost intenzity osvětlení je v této práci udávána v procentech zejména z toho důvodu, že v době měření se na univerzitě nenacházel normál, což je žárovka s normovanými parametry, pomocí které se pak kalibrují naměřené hodnoty osvětlenosti měřeného světelného zdroje. Tato skutečnost neměla na potřebná měření zásadní vliv, jediným negativním důsledkem je fakt, že díky neznalosti přesné velikosti světelného toku nelze vypočítat měrný výkon svítidla.

Závislost P (W), LED s $T_c = 2\,700\text{ K}$



Obr. 60 Vykreslení závislosti příkonu na velikosti střidy pro teplou LED

Závislost P (W), LED s $T_c = 5\,000\text{ K}$

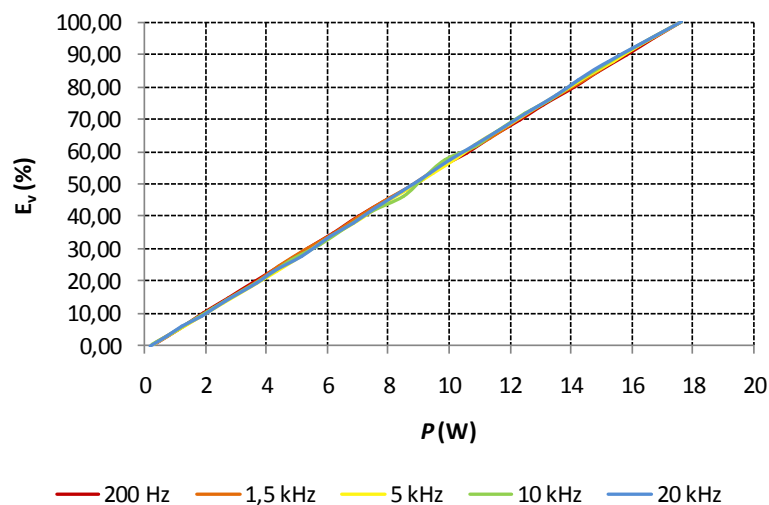


Obr. 61 Vykreslení závislosti příkonu na velikosti střidy pro studenou LED

Na těchto průbězích si lze opět potvrdit skutečnost, že při vyšších spínacích frekvencích klesá střední hodnota dodávaného výkonu.

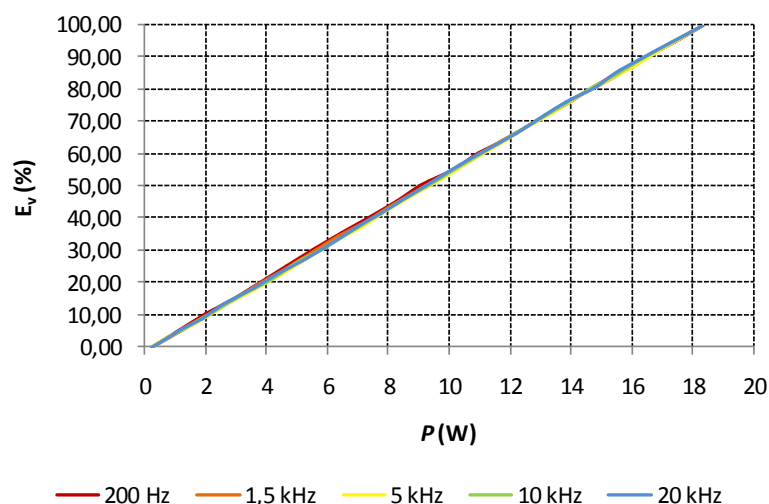
Na všech výše uvedených průbězích je také patrné, že ač se průběhy pro různé spínací frekvence při stmívání liší, tak při střídě 100 % se vždy setkávají, je to dáno zejména tím, že stmívací obvod ILD6150 je schopen v maximu dodávat spínáním nepřerušovaný konstantní proud.

Závislost E_v (%) na P (W), LED s $T_c = 2\,700\text{ K}$



Obr. 62 Vykreslení závislosti procentuální intenzity osvětlení na příkonu pro teplou LED

Závislost E_v (%) na P (W), LED s $T_c = 5\,000\text{ K}$



Obr. 63 Vykreslení závislosti procentuální intenzity osvětlení na příkonu pro studenou LED

Na výše uvedených grafech lze pozorovat, že průběhy pro všechny spínací frekvence mají stejný sklon a leží na sobě, z čehož lze vyvodit, že žádná zvolená spínací frekvence do 20 kHz nezpůsobuje znatelné přidavné výkonové ztráty a měrný výkon tak zůstává stejný.

Experimentálním měřením bylo zjištěno, že změnou spínací frekvence se při stejné velikosti střídavy mění dodávaný výkon a úměrně tomu také intenzita osvětlení, z čehož vyplývá, že jednou navržené řídicí křivky jsou vázány na jednu velikost spínací frekvence. Dojde-li k výraznější změně velikosti spínací frekvence, bude zapotřebí provést nové měření a nový návrh řídicích křivek.

9.3 Dodatečné měření na fotometrické lavici

Z důvodu odlišných hodnot náhradní teploty chromatičnosti bylo provedeno dodatečné měření pomocí fotometrické lavice, aby se vyloučil vliv kulového integrátoru na výsledky měření.

Fotometrická lavice – Jedná se o laboratorní pomůcku sloužící zejména k měření svítivosti světelných zdrojů pod různými úhly. Lavice je opatřena posuvnou plošinou, na které je umístěn měřicí přístroj a otočnou plošinou s vyznačenými úhly natočení, na které je umístěno měřené svítidlo.

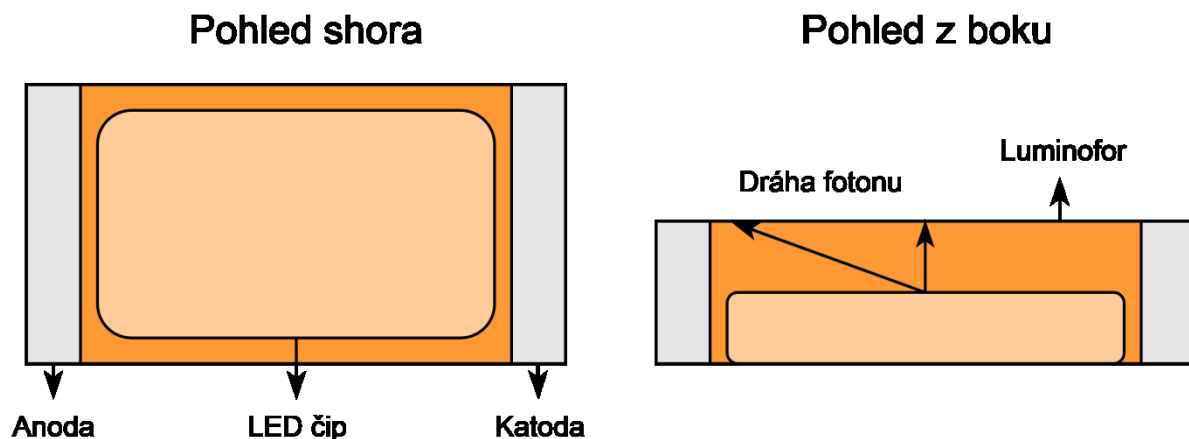
Pro vyloučení vlivu kulového integrátoru bylo svítidlo umístěno do fotometrické lavice a měřeno za pomoci spektrofotometru pod třemi úhly natočení, 0 stupňů, 70 stupňů a 80 stupňů.

Tab. 6 Naměřené hodnoty náhradní teploty chromatičnosti při různých úhlech natočení

Úhel natočení svítidla [°]	Náhradní teplota chromatičnosti [K]	
	Studená	Teplá
0	4835	2767
70	4491	2661
80	4338	2549

Z naměřených hodnot v tabulce vychází, že teplé LED diody změní svou náhradní teplotu chromatičnosti pod úhlem 80° o 200 K a studené LED diody až o 500 K.

Měřením bylo zjištěno, že rozdíl mezi hodnotami udávanými výrobcem a hodnotami naměřenými za pomoci kulového integrátoru, je způsoben technologickým zpracováním daných LED diod.



Obr. 64 Ilustrační obrázek vyobrazující dráhu fotonů procházejících luminoforem

Z ilustračního obrázku je patrné, že světlo vystupující kolmo z LED čipu prochází tenčí vrstvou luminoforu, než světlo vystupující pod úhlem. Jak bylo vysvětleno v kapitole 3.1.2, tak s rostoucí velikostí vrstvy luminoforu roste také pravděpodobnost, s jakou foton do atomu luminoforu narazí a změní tak svou vlnovou délku. Světlo vystupující pod úhlem má tím pádem nižší náhradní teplotu chromatičnosti (je teplejší) a kulový integrátor pak zapříčiní, že světlo vyhodnocené měřicím přístrojem je suma světelného toku ve všech směrech.

10. Návrh a měření řídicích křivek LED svítidla

10.1 Měření řídicích křivek

Pro měření řídicích křivek bylo využito kulového integrátoru a spektrofotometru Jeti specbos 1211 a generátoru funkcí MFG2140AF, kdy na jednom kanálu generátoru byl připojen stmívací obvod pro teplé LED a na druhém kanálu byl připojen stmívací obvod pro studené LED. Pro pulzně šířkovou modulaci byla zvolena spínací frekvence 1500 Hz.

Měření řídicích křivek probíhalo následovně:

Nejprve byla nastavena konstantní hodnota střídání pro teplé LED na 5 %, a k ní se inkrementálně po 5 % přidávaly studené LED od 5 % do 100 %. Dále se nastavilo 10 % střídání pro teplé LED a opět se k ní se inkrementálně po 5 % přidávaly studené LED od 5 % do 100 %. Takto se s inkrementem 5 % postupovalo až do 50 % střídání pro teplé LED.

Následně byla nastavena konstantní hodnota střídání pro studené LED na 5 %, a k ní se inkrementálně po 5 % přidávaly teplé LED od 55 % do 100 %. Dále se nastavilo 10 % střídání pro studené LED a opět se k ní se inkrementálně po 5 % přidávaly teplé LED od 5 % do 100 %. Takto se s inkrementem 5 % postupovalo až do 50 % střídání pro studené LED.

Z důvodu chlazení byl předpokladem k měření fakt, že svítidlo se v provozu nebude dlouhodobě výkonově pohybovat nad hodnotou 100 % výkonu jednoho typu LED (teplé nebo studené).

10.2 Návrh řídicích křivek

Výstupem měření byla sít' hodnot, pomocí kterých lze sestavit požadované řídicí křivky.

Předpokladem pro sestrojení bylo, že uživatel si bude moct nastavit na svítidlu jas a náhradní teplotu chromatičnosti nezávisle na sobě. Z naměřených hodnot bylo tedy zapotřebí vyhledat hodnoty nejbližší požadovaným hodnotám.

Pro sestrojení řídicích křivek byl využit program Microsoft Excel.

Tab. 7 Příklad rozvržení naměřených hodnot náhradní teploty chromatičnosti s příslušnými hodnotami střídání

Teplá	Studená			
	1	5	10	...
5	2762	3302	3627	...
10	2700	3041	3314	...
15	2679	2928	3159	...
20	2666	2862	3061	...
...

10.2.1 Řídicí křivky pro změnu intenzity osvětlení při zachování konstantní náhradní teploty chromatičnosti.

V první řadě bylo zapotřebí si určit, po jakém kroku se bude teplota chromatičnosti měnit. K dosažení vysoké citlivosti regulace byla zvolena hodnota 100 K. Pro sestrojení grafů je potřeba k hodnotám střídavy pro teplou LED (nebo studenou) přiřadit hodnotu střídavy studené LED, pomocí které dosáhneme požadované náhradní teploty chromatičnosti.

Tyto hodnoty bylo zapotřebí vyhledat v naměřených hodnotách, pro což byla napsána v excelu funkce:

=INDEX(D32:X32;POZVYHLEDAT(MIN(ABS(E64-D33:X33));ABS(E64-D33:X33);0))

Funkce pracuje následovně:

D32:X32

- rozsah hodnot střídavy od 0 - 100.

D33:X33

- rozsah naměřených hodnot náhradní teploty chromatičnosti pro danou konstantní hodnotu střídavy teplé LED.

E64

- v této buňce je vepsána zvolená hodnota teploty chromatičnosti, např. 3 000 K.

MIN(ABS(E64-D33:X33))

- ABS vydá absolutní hodnotu všech čísel v rozsahu D33:X33 po odečtení čísla E64.
- Funkce MIN z toho poté vydá minimální hodnotu k vyhledání pro funkci POZVYHLEDAT.

ABS(E64-D33:X33)

- ABS vydá absolutní hodnotu všech čísel v rozsahu D33:X33 po odečtení čísla E64, což udává rozsah hodnot, ve kterých má funkce POZVYHLEDAT vyhledávat.

0

- Udává shodu s hledaným číslem (0 - přesná shoda, 1 - menší než, -1 - větší než).

POZVYHLEDAT

- Vydá funkci INDEX pozici vyhledané hodnoty, která je nejbližší hodnotě v buňce E64 (hodnota teploty chromatičnosti).

INDEX

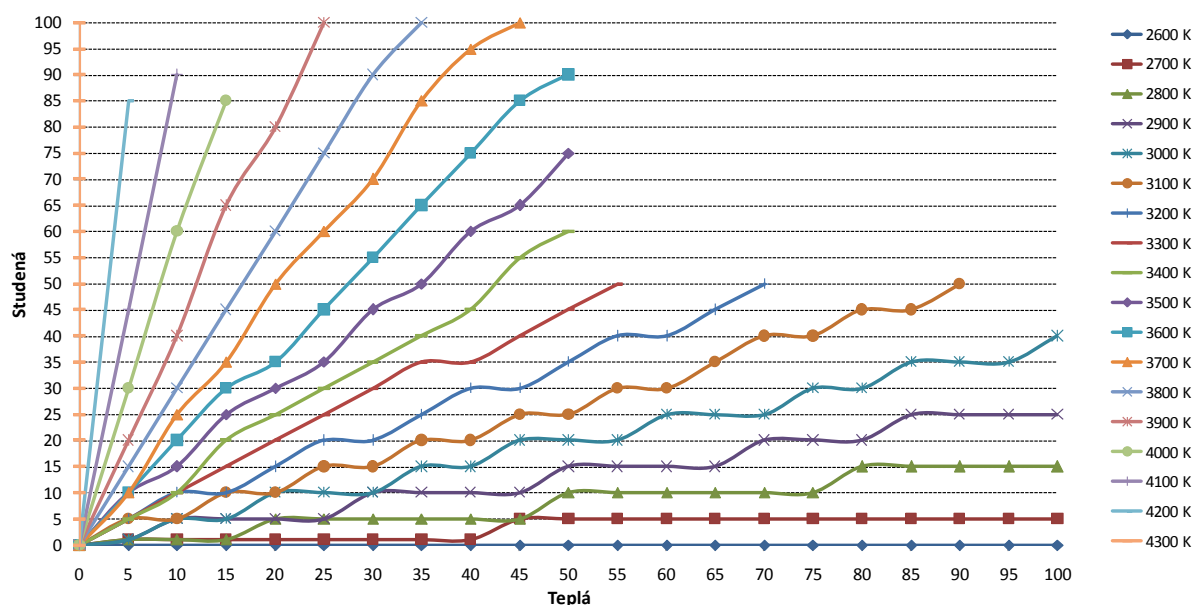
- Vepíše do buňky hodnotu z rozsahu D32:X32 (rozsah hodnot střídavy od 0 - 100), jejíž pozice odpovídá pozici hodnoty vyhledané pomocí funkce POZVYHLEDAT.

Výsledkem je poté tabulka hodnot, kde je pro každou X hodnotu (hodnota střidy teplé LED) přiřazena Y hodnota (hodnota střidy studené LED), která odpovídá nejbližší hodnotě ke zvolené hodnotě náhradní teploty chromatičnosti.

Tab. 8 Příklad rozvržení tabulky s přiřazenými hodnotami odpovídajícími zvolené teplotě chromatičnosti

X	Y	Y	Y	Y	Y
	2600 K	...	3000 K	...	4300 K
0	0	...	0	...	0
5	0	...	1	...	5
10	0	...	5	...	10
...
90	0	...	35	...	90
95	0	...	35	...	95
100	0	...	40	...	100

Z takto sestrojené tabulky je pak možno vykreslit přibližný průběh řídících křivek pro konstantní náhradní teplotu chromatičnosti.



Obr. 65 Řídící křivky pro konstantní náhradní teplotu chromatičnosti vykreslené z naměřených hodnot

Z grafu je zřejmé, že průběhy řídících křivek budou mít lineární průběh a tudíž dalším krokem bude jejich linearizace, díky čemuž se z větší části odstraní nepřesnosti způsobené metodou vyhledávání nejbližších naměřených hodnot.

V grafu můžeme také pozorovat, že u křivek 4000 K – 4200 K chybí maximální hodnoty, je to z důvodu nedostatku zvolené metody. Hodnoty v daném rozsahu chybí a funkce jim tedy přiřadila nevhodné hodnoty střidy, které by změnily sklon křivky → pro zpřesnění následné linearizace byly tyto hodnoty odstraněny.

Pro linearizaci křivek existuje v excelu funkce "Přidat spojnici trendu", s následnou možností zobrazení rovnice regrese, což křivku linearizuje a v grafu zobrazí rovnici ve tvaru $y = ax + b$.

Pomocí této rovnice jsme pak schopni dopočítat jakoukoliv y-ovou hodnotu pro zadanou x-ovou hodnotu (nebo naopak). Tento způsob je vhodný, pouze pokud není křivek příliš mnoho, neboť při změně vstupních hodnot bychom museli rovnice do buněk znovu ručně přepisovat.

Tento problém se dá vyřešit pomocí funkcí SLOPE a INTERCEPT.

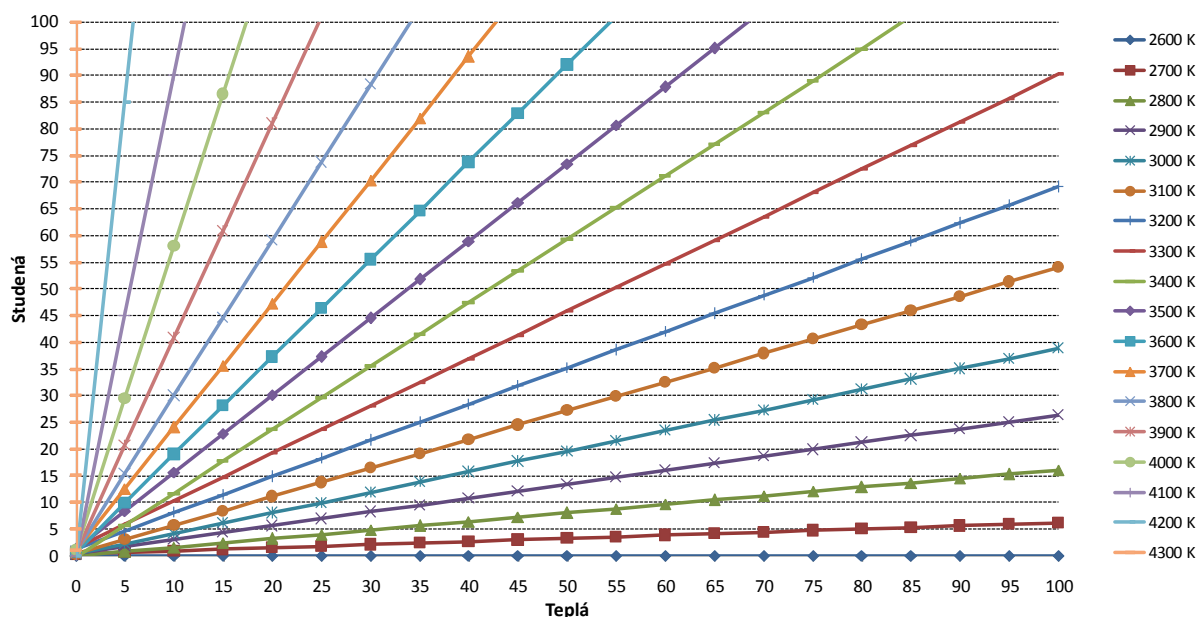
$=\text{SLOPE}(\text{C125:C145};\text{B125:B145})$, kde C125:C145 jsou hodnoty střídý na Y-ové ose a B125:B145 jsou hodnoty střídý na X-ové ose.

- Funkce SLOPE vrátí směrnici (sklon) regresní přímky proložené zadanými Y a X hodnotami.
- Funkce SLOPE vypočte z rovnice $y = ax + b$ hodnotu **a**.

$=\text{INTERCEPT}(\text{C125:C145};\text{B125:B145})$

- Funkce INTERCEPT vrátí souřadnice bodu, ve kterém regresní křivka protne Y-ovou osu pomocí zadaných X a Y hodnot.
- Funkce INTERCEPT vypočte z rovnice $y = ax + b$ hodnotu **b**.

Pomocí těchto hodnot získáváme rovnice regresních přímek pro všechny zvolené hodnoty náhradní teploty chromatičnosti. Za pomocí těchto rovnic lze pro zadané x-ové hodnoty dopočítat y-ové hodnoty a následně vykreslit linearizované křivky pro konstantní náhradní teplotu chromatičnosti.



Obr. 66 Linearizované křivky pro konstantní náhradní teplotu chromatičnosti vykreslené pomocí rovnic lineární regrese

10.2.2 Řídicí křivky pro změnu náhradní teploty chromatičnosti při zachování konstantní intenzity osvětlení.

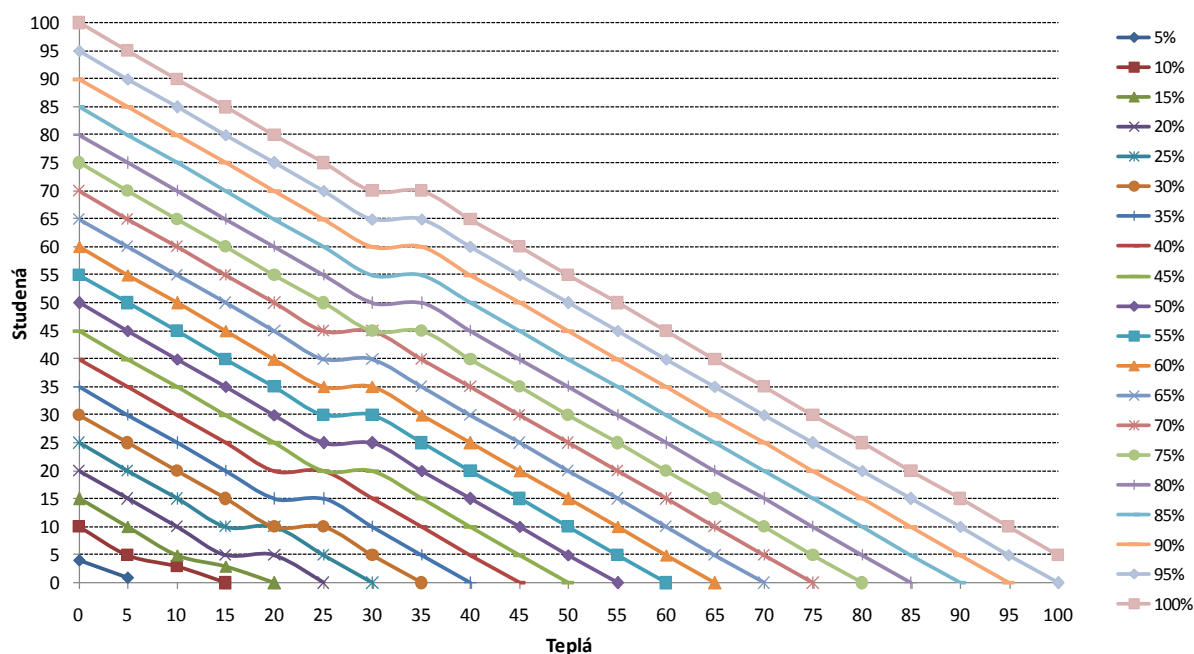
Pro sestrojení řídicích křivek měnících teplotu chromatičnosti při zachování konstantní intenzity osvětlení je možno postupovat obdobným způsobem jako v předchozím případě.

Jak již bylo zmíněno výše, tak předpokladem pro sestrojení řídicích křivek byl fakt, že svítidlo by se v provozu nemělo dostat dlouhodobě nad 100 % jmenovitého výkonu jednoho typu LED.

V naměřených hodnotách je tudíž potřeba nalézt maximální hodnotu intenzity osvětlení jednoho typu LED (teplé nebo studené), což bude oněch zmiňovaných 100 %.

Následně je zapotřebí si určit citlivost, s jakou se bude regulace provádět. Pro zachování celkové jemnosti regulace osvětlení byl zvolen rozsah regulace od 0 do 100 % s inkrementem 5 % intenzity osvětlení.

Za pomoci výše popsanych funkcí je možno si vytvořit tabulky s hodnotami stříd pro jednotlivé řídicí křivky a vykreslit orientační řídicí křivky z naměřených hodnot.

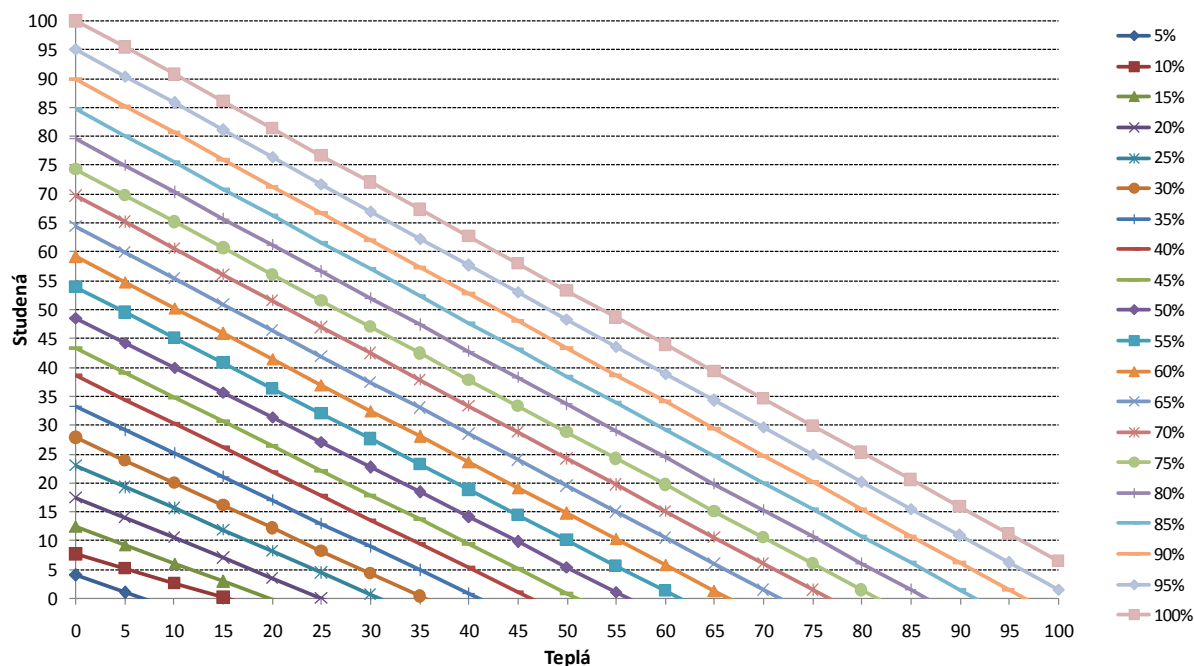


Obr. 67 Řídicí křivky pro konstantní intenzitu osvětlení vykreslené z naměřených hodnot

Z průběhů v grafu uvedeném výše je patrné, že hodnoty křivek pro intenzitu osvětlení 10 % a 15 % jsou pozměněny. Je to z důvodu eliminace nepřesnosti způsobené danou vykreslovací metodou, která křivky vykresluje za pomoci naměřených hodnot.

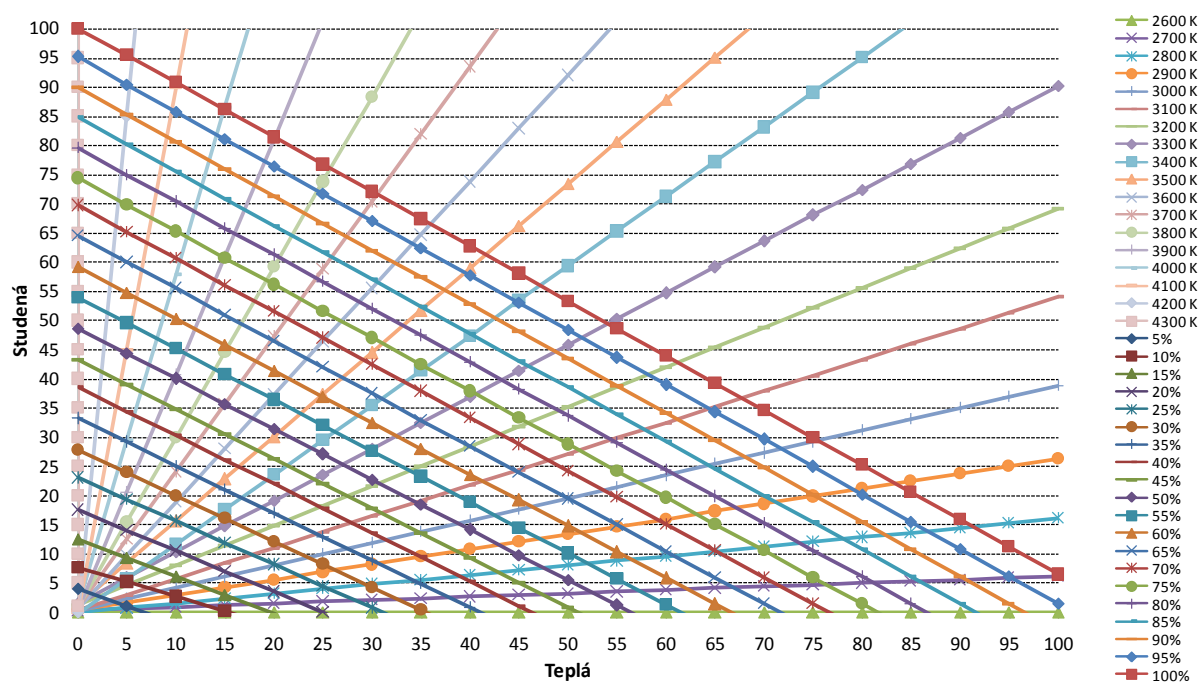
Jelikož neexistují naměřená data s dostatečně nízkým krokem v nízkých hodnotách stříd, tak bylo nutno hodnoty pozměnit tak, aby sklon těchto dvou křivek po linearizaci odpovídal zbylým vykresleným křivkám, čímž vzniká pouze zanedbatelná chyba.

Použitím funkce SLOPE a INTECEPT je možno opět vytvořit rovnice přímek a po dosazení x-ových hodnot vypočíst y-ové hodnoty, čímž vznikne tabulka hodnot, ze které lze vykreslit linearizované řídicí křivky pro řízení náhradní teploty chromatičnosti, při zachování konstantní intenzity osvětlení.



Obr. 68 Linearizované křivky pro konstantní intenzitu osvětlení vykreslené pomocí rovnic lineární regrese

Na **Obr. 69** je možno vidět předběžné vykreslení zkombinovaných řídicích křivek.



Obr. 69 Zkombinované linearizované řídicí křivky

Z průběhů uvedených výše je při pozorování přímky pro konstantní 100 % intenzitu osvětlení zřejmé, že teplé a studené LED diody nemají totožnou velikost světelného toku. Z průběhu křivek je patrné, že modré LED diody mají nepatrně vyšší měrný výkon.

Tuto nedokonalost je možno odstranit změnou LED diod, případně mírnou úpravou hodnot v tabulce.

S takto sestrojenými křivkami už by bylo teoreticky možno svítidlo řídit, ale pro usnadnění práce a pro přesnější regulaci lze křivky vykreslit pomocí bodů, ve kterých se jednotlivé přímky protínají.

10.2.3 Řídicí křivky pro nezávislou regulaci náhradní teploty chromatičnosti a intenzity osvětlení, vykreslené pomocí společných bodů průniku.

Program Excel jako takový není schopen rozpoznat, zdali se vykreslené křivky v grafu protínají, či nikoliv. Na vyřešení tohoto problému je poté adekvátní použít sofistikovanější program jako například Matlab.

Avšak díky tomu, že křivky mají po linearizaci tvar přímky a lze je popsat rovnicí přímky, tak zde existuje možnost si průsečíky přímek dopočítat a následně vykreslit pomocí programu Excel.

$$y_1 = a_1 x_1 + b_1 \quad y_2 = a_2 x_2 + b_2 \quad (1.10)$$

K dopočtení průsečíku stačí, abychom tyto rovnice položili do rovnosti.

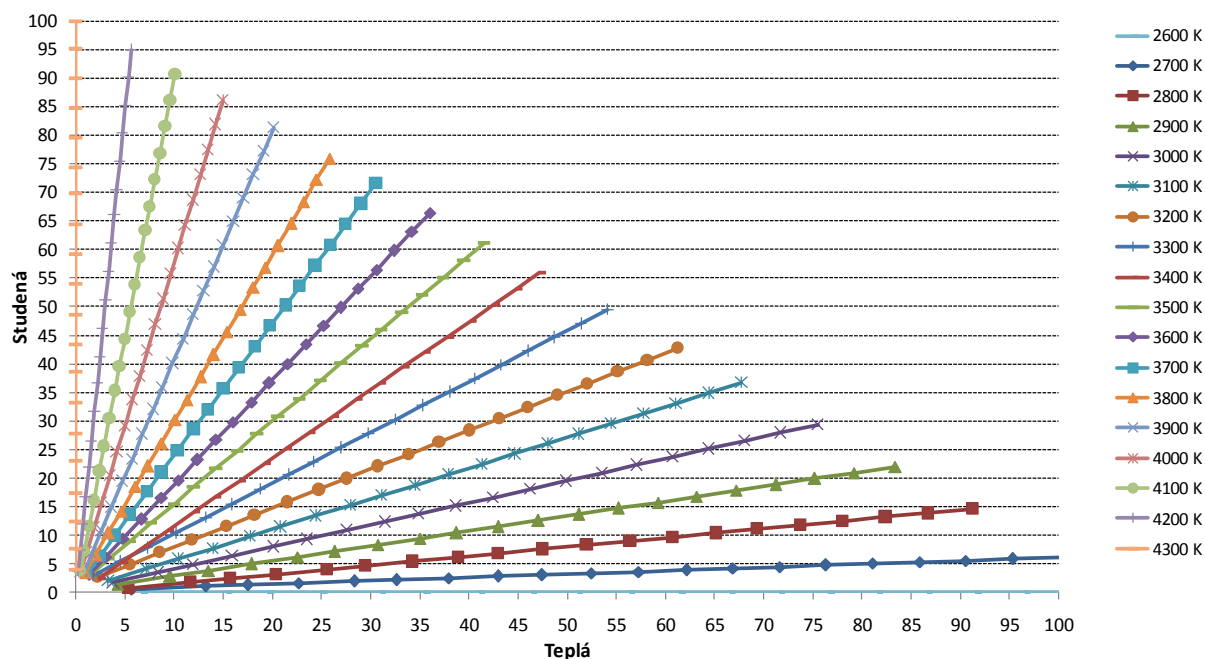
$$a_1 x + b_1 = a_2 x + b_2 \quad (1.11)$$

$$x = \frac{b_2 - b_1}{a_1 - a_2} \quad (1.12)$$

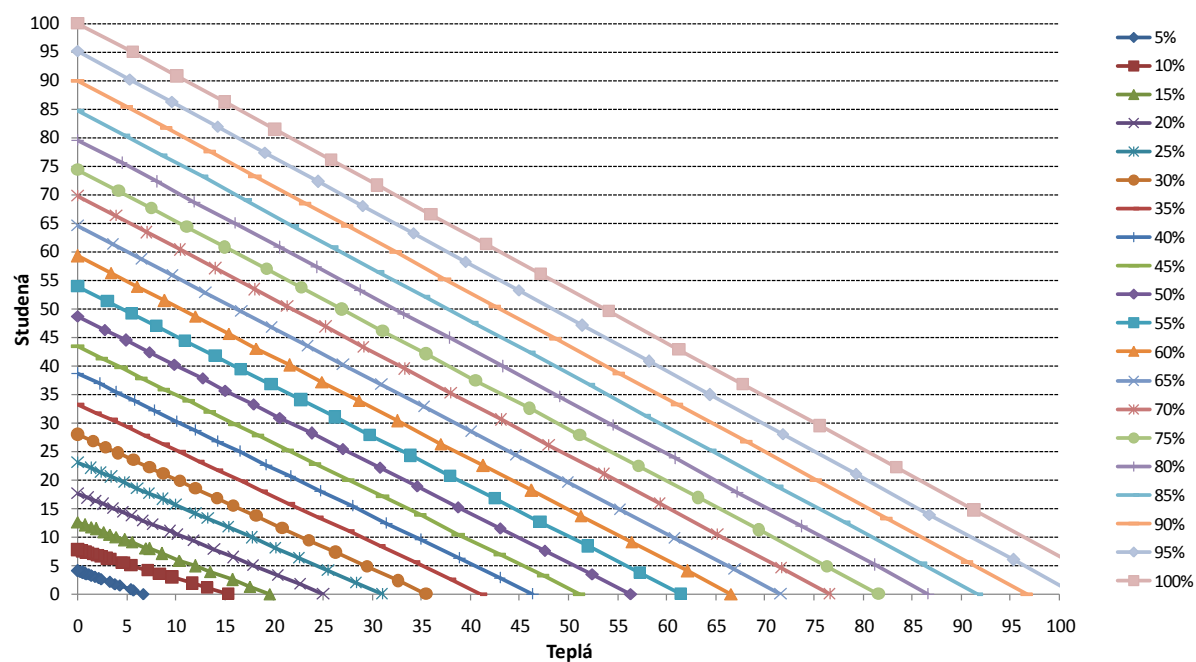
$$y = ax + b \quad (1.13)$$

Hodnoty **a** a **b** je možno opět dopočítat pomocí funkcí SLOPE pro výpočet hodnot **a** a INTERCEPT pro výpočet hodnot **b**.

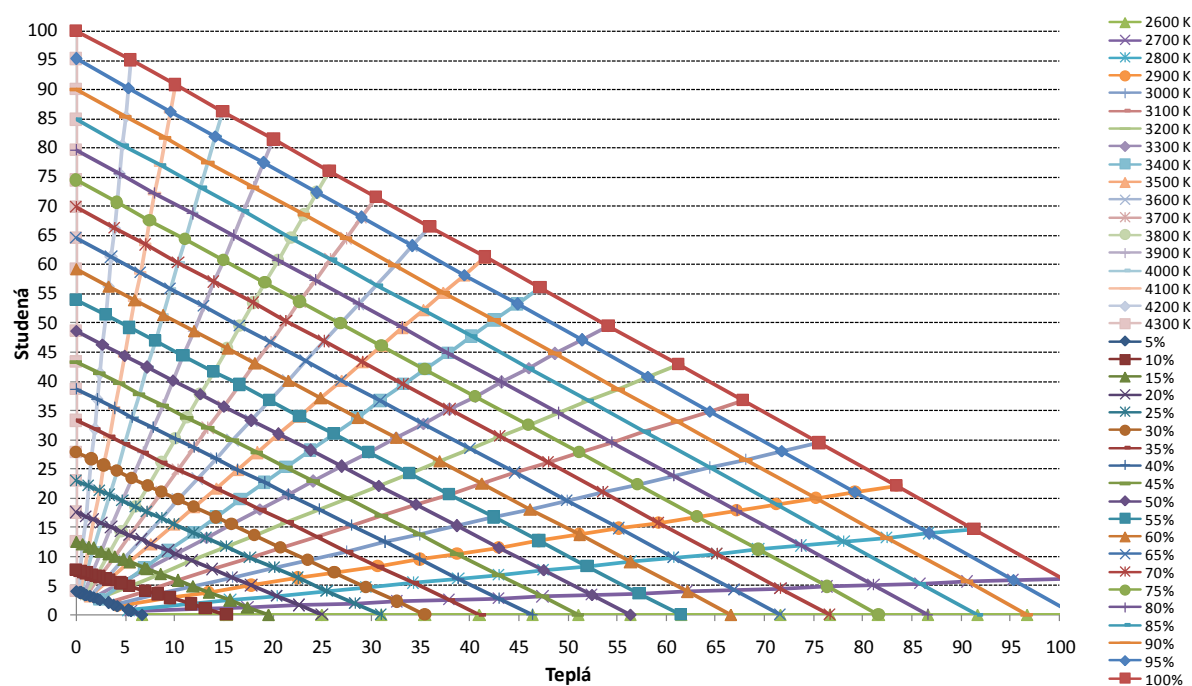
Pomocí těchto rovnic je možno vytvořit tabulku hodnot, díky které lze vykreslit křivky se společnými body průniku.



Obr. 70 Řídicí křivky pro konstantní náhradní teplotu chromatičnosti vykreslené pomocí bodů průsečíku



Obr. 71 Řídicí křivky pro konstantní intenzitu osvětlení vykreslené pomocí bodů průsečíku



Obr. 72 Finální graf řídicích křivek pro nezávislou regulaci náhradní teploty chromatičnosti a intenzity osvětlení

Z výše uvedeného grafu můžeme pozorovat, jak bude řízení svítidla uskutečněno.

Výsledkem je tabulka hodnot, kterou lze nahrát do mikroprocesoru a řízení se tak bude provádět po krocích, které byly stanoveny na počátku návrhu.

Tab. 9 Příklad rozvržení tabulky s výslednými hodnotami upravenými pro zpracování mikroprocesorem

	X Y		X Y		X Y		X Y		X Y	
	2600 K		2700 K		...		4200 K		4300 K	
5 %	6,7	0,0	5,6	0,6	...	...	0,2	3,9	0,0	4,0
10 %	15,3	0,0	13,2	1,1	...	...	0,4	7,4	0,0	7,7
15 %	19,5	0,0	17,5	1,3	...	...	0,7	12,0	0,0	12,5
20 %	25,0	0,0	22,7	1,6	...	...	1,0	16,8	0,0	17,5
...
95 %	101,6	0,0	95,3	5,9	...	...	5,3	90,2	0,0	95,2
100 %	106,9	0,0	100,3	6,2	...	...	5,6	95,0	0,0	100,2

V tabulce je možno pozorovat, že hodnoty vyznačené červenou barvou se pohybují nad 100 %.

Je to dáno tím, že studené LED mají nepatrně vyšší hodnotu měrného výkonu než teplé LED a nedosahují tak při hodnotě střídavy 100 % stejné hodnoty světelného toku. Jelikož se na řídicím obvodu nedá nastavit vyšší hodnota střídavy než 100 %, tak bude potřeba tyto hodnoty snížit na hodnotu menší než 100 %, čímž se dopustíme pouze nepatrné regulační odchylky.

Závěr

Cílem diplomové práce bylo především naměření provozních parametrů reálného svítidla a následný návrh řídicích křivek, pomocí kterých bude svítidlo v provozu řízeno. Svítidlo bude využíváno k vnitřnímu osvětlení, kdy bude uživateli poskytnuta možnost změny náhradní teploty chromatičnosti a intenzity osvětlení nezávisle na sobě, a to pomocí dvou nástěnných tlačítek, případně pomocí dálkového ovládání. Předpoklad pro vytvoření řídicích charakteristik byl, že svítidlo nebude v provozu pracovat nad 100 % výkonu jednoho typu LED (studené nebo teplé).

Ze změřených průběhů vstupních veličin svítidla v kapitole 0 bylo zjištěno, že pro zachování stejné velikosti dodávaného výkonu je nutno měnit hodnotu střídavé frekvence. Měřením bylo zjištěno, že při změně spínací frekvence z 200 Hz na 20 kHz je nutno zvýšit střihu až o 10 %.

V kapitole 9.2 jsou prezentovány naměřené průběhy vyobrazující závislost provozních parametrů LED svítidla na spínací frekvenci, při různých hodnotách střídavé frekvence. Z naměřených průběhů je zřejmé, že použité LED diody jsou kvalitní a jejich parametry se mění se změnou napájení pouze minimálně. Měřením závislosti R_a indexu na spínací frekvenci při střídavé jako proměnné se zjistilo, že velikost hodnoty R_a indexu je na spínací frekvenci a velikosti střídavé frekvence nezávislá.

Z měření závislosti náhradní teploty chromatičnosti na spínací frekvenci vyplývá, že hodnota teploty chromatičnosti je na spínací frekvenci nezávislá a mění se pouze nepatrně se změnou hodnoty střídavé frekvence. Největší změna nastala u studené LED, u které se náhradní teplota chromatičnosti změnila o 30 K. V grafech bylo také ponecháno jedno chybné měření, při kterém nebylo svítidlo zahřáno na pracovní teplotu a na průběhu je tak patrné, jak se náhradní teplota chromatičnosti s teplotou svítidla mění. Maximální rozdíl mezi náhradní teplotou chromatičnosti pro zahřáté a nezahřáté svítidlo je cca 10 K. Dalším poznatkem získaným tímto měřením byla skutečnost, že naměřená náhradní teplota chromatičnosti se lišila od hodnoty udávané výrobcem. Dodatečným měřením na fotometrické lavici bylo zjištěno, že rozdíl v hodnotách je zapříčiněn technologickým procesem nanášení luminoforu na LED, kdy vyzařované světlo pod úhlem je teplejší, což se následně projevilo při měření v kulovém integrátoru. K největší odchylce ve velikosti náhradní teploty chromatičnosti dochází u studené LED, kde změna T_c při měření pod úhlem činí až 500 K oproti měření ve fotometrické ose svítidla.

Vykreslením průběhů závislosti intenzity osvětlení na spínací frekvenci byla potvrzena skutečnost, že s rostoucí spínací frekvencí klesá střední hodnota dodávaného výkonu a následně také intenzita osvětlení. Z toho je možno vyvodit, že navržené řídicí křivky jsou vázány na jednu hodnotu spínací frekvence a se změnou spínací frekvence bude potřeba křivky navrhnout znovu.

Závislost intenzity osvětlení na elektrickém příkonu na Obr. 62 a Obr. 63 ukazuje, že změna spínací frekvence nemá vliv na velikost měrného výkonu LED svítidla.

Práce dále zahrnuje podrobný návod popisující návrh řídicích křivek, sestavených pomocí získaných naměřených dat. Návrh řídicích křivek byl proveden za pomoci programu Excel, jelikož se jedná o nejrozšířenější a nejdostupnější tabulkový procesor, což dodává vytvořenému souboru na univerzálnosti. U křivek vykreslených pomocí naměřených hodnot je patrné, že řídicí křivky mají lineární charakter a lze je tak pomocí regresní křivky linearizovat. Tato skutečnost nám říká, že pro sestavení nových řídicích křivek není nutno provádět velké množství měření, ale že postačí naměřit pouze krajní hodnoty s patřičným krokem a pomocí těchto hodnot pak lineární křivky v Excelu vykreslit.

Za největší přínos mé práce považuji vytvoření speciálních funkcí v tabulkovém procesoru

Excel, které vykreslení řídicích křivek zcela automatizují. Stačí pouze do příslušných tabulek dosadit vlastní naměřená data a navržené funkce již samy řídicí křivky vykreslí a vytvoří tabulku s řídicími hodnotami vhodnými pro importování do mikrokontroléru. V práci je také popsán návrh řídicích křivek krok po kroku, tudíž případný čtenář, který nebude mít Excel soubor k dispozici, si bude moci vytvořit svůj vlastní soubor a křivky si tak sám vykreslit. Nemalý přínos vidím také v kompilačním charakteru úvodní části mé práce, která je koncipována tak, aby čtenáře snadno uvedla do problematiky řízení LED svítidel, kdy po přečtení bude mít čtenář dostatek informací potřebných pro následné hlubší pochopení dané problematiky. Vzhledem k tomu, že v současné době neexistuje mnoho literatury zabývající se tématem řízení náhradní teploty chromatičnosti, je tato práce dobrým zdrojem základních informací a postupů, které se této problematiky týkají. Řízení náhradní teploty chromatičnosti není v současné době příliš probírané téma, ačkoliv jak bylo v práci prezentováno, tak řízení náhradní teploty chromatičnosti svítidel poskytuje další možnost, jak si uživatel může upravit a zpříjemnit jeho prostředí, čímž si zajistí psychický a zrakový komfort.

Případným zájemcům o toto téma, bych doporučil se zaměřit na využití senzorů a řídicích obvodů schopných dynamicky řídit intenzitu osvětlení a náhradní teplotu chromatičnosti v závislosti na venkovních světelných podmínkách.

Seznam literatury

- [1] The Light Emitting Diode. *ElectronicsTutorials* [online]. Praha [cit. 2017-10-20]. Dostupné z: https://www.electronics-tutorials.ws/diode/diode_8.html
- [2] Jak LED diody fungují. *LED SOLUTION* [online]. Liberec, ©2017 [cit. 2017-10-20]. Dostupné z: <https://eshop.ledsolution.cz/led-diody-technicke-udaje/>
- [3] GUPTA, K. V. Kumar. LED packaging technology can cut cost drastically. *ElectronicsB2B* [online]. Quality Photonics P, 2014, January 4, 2014 [cit. 2017-10-25]. Dostupné z: <http://www.electronicb2b.com/important-sectors/the-led-packaging-technology-aims-at-tenth-of-present-cost/>
- [4] KOUTNÝ, Jaroslav a Ivo VLK. *Elektronika I učebnice*. VYTVOŘENO V RÁMCI PROJEKTU: DIGITÁLNÍ ŠKOLA: ICT VE VÝUCE TECHNICKÝCH PŘEDMĚTŮ, REG. Č. CZ.1.07/1.1.04/01.0137, Vyšší odborná škola a Střední průmyslová škola elektrotechnická, Olomouc 2009
- [5] PELANT, Ivan, Jan VALENTA, Nenad LALIC a Jan LINNROS. Celokřemíková optoelektronika v dohledu?: Elektroluminiscenční diody z porézního křemíku. *Vesmír* [online]. Praha, 1998, 5. 2. 1998 [cit. 2017-10-25]. Dostupné z: <https://vesmir.cz/cz/casopis/archiv-casopisu/1998/cislo-2/celokremikova-optoelektronika-dohledu.html>
- [6] LENHARD, Radomír. *FYZIKA POLOVODIČŮ: PŘECHOD PN* [online]. Brno: Masarykova Univerzita, 2013 [cit. 2017-11-05]. Dostupné z: https://is.muni.cz/www/108960/trans/navody/skripta_prechod_PN.pdf
- [7] *Kurz osvětlovací techniky XXVII* [online]. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2009 [cit. 2017-11-06]. ISBN 978-80-248-2087-3. Dostupné z: http://www.csorsostrava.cz/sborniky/Kurz_osvetlovaci_techiky_XXVII.pdf
- [8] STAŠA, Michal. Účinnosti světelných zdrojů. *Světloblog* [online]. 2017, 25. ledna 2017 [cit. 2017-11-15]. Dostupné z: <http://www.svetloblog.cz/index.php?blog=ucinnosti-svetelnych-zdroju>
- [9] *Energy Efficiency of LEDs* [online]. U.S. Department of Energy, 2013 [cit. 2017-11-20]. Dostupné z: http://www.hi-led.eu/wp-content/themes/hiled/pdf/led_energy_efficiency.pdf
- [10] *LEDs Magazine* [online]. PennWell Corporation, 2016, (88) [cit. 2017-11-20]. ISSN 2156-633X. Dostupné z: <http://digital.ledsmagazine.com/ledsmagazine/201606?WS0616&pg=58#pg58>
- [11] The Light Emitting Diode. *ElectronicsTutorials* [online]. Praha [cit. 2017-12-01]. Dostupné z: https://www.electronics-tutorials.ws/diode/diode_8.html
- [12] Voltampérová charakteristika LED. *Remote-LAB GymKT* [online]. Klatovy: Gymnázium J. Vrchlického, ©2018 [cit. 2017-12-07]. Dostupné z: <http://remote-lab.fyzika.net/experiment/04/experiment-4-teorie.php?lng=cs>
- [13] SMITH, Hallam. LED Colour Mixing Explained. *Pulsar* [online]. Pulsar, 2016, April 19, 2016 [cit. 2017-12-08]. Dostupné z: <http://pulsarlight.com/led-colour-mixing-explained/>
- [14] How to use a RGB LED with Arduino: What is RGB LED?. *How To Mechatronics* [online]. ©2018 [cit. 2017-12-08]. Dostupné z: <https://howtomechatronics.com/tutorials/arduino/how-to-use-a-rgb-led-with-arduino/>
- [15] LED TECHNOLOGY. *Merck* [online]. ©2017 [cit. 2017-12-09]. Dostupné z: <https://www.merckgroup.com/en/expertise/optoelectronics/services/led-technology.html>
- [16] MILLER, Naomi. UNDERSTANDING LED COLOR-TUNABLE PRODUCTS. *Office of Energy Efficiency and Renewable Energy* [online]. [cit. 2017-12-09]. Dostupné z: <https://www.energy.gov/eere/ssl/understanding-led-color-tunable-products>
- [17] Určování spolehlivosti komerčních LED svítidel. *LED4industry* [online]. Králův Dvůr, ©2015 [cit. 2017-12-09]. Dostupné z: <https://www.led4industry.cz/urcovani-spolehlivosti-led-svitidel>
- [18] VYZAŘOVACÍ ÚHEL. *LEDsviti.cz* [online]. Česká Lípa, ©2017 [cit. 2017-12-12]. Dostupné z:

- <https://www.ledsviti.cz/vyzarovaci-uhel/>
- [19] Vyzařovací charakteristika. In: *VymenZarovku* [online]. Hradec Králové: Smart-Print, 2015, 2015 [cit. 2017-12-12]. Dostupné z: <http://www.vymenzarovku.cz/s/waty-lumeny>
 - [20] INDEX PODÁNÍ BAREV, CRI / RA. *SMDLEDŽÁROVKY.CZ* [online]. Bohumín - Záblatí [cit. 2017-12-16]. Dostupné z: <https://www.smdledzarovky.cz/nas.radce/index.podani.barev>
 - [21] SOUMAR, František. Základní veličiny osvětlení – srozumitelně!. *Doublepower!!* [online]. Bohumín - Záblatí, 2017, 20.2.2017 [cit. 2017-12-16]. Dostupné z: <https://www.doublepower.cz/zakladni-veliciny-osvetleni-srozumitelne/>
 - [22] SOKANSKÝ, Karel. *Světelná technika*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04941-9.
 - [23] Svítivost, světelný tok a intenzita osvětlení. *K-LED* [online]. Vyšehrad [cit. 2017-12-20]. Dostupné z: <https://k-led.cz/content/10-svitivost-svetelny-tok-a-intenzita-osvetleni>
 - [24] KONDZIOLKA, Jan. Světelné znečištění. *Výbojky-Žárovky*[online]. [cit. 2017-12-20]. Dostupné z: <http://www.vybojky-zarovky.cz/text26.html>
 - [25] SCULLY, Taylor. What Type of LED Driver Do I Need? Constant Current vs. Constant Voltage. *LEDsupply* [online]. Randolph, 2015, october 6, 2015 [cit. 2017-12-21]. Dostupné z: <https://www.ledsupply.com/blog/constant-current-led-drivers-vs-constant-voltage-led-drivers/>
 - [26] WANG, Vincent. Get what you need for LED driver protection. *Electronic PRODUCTS* [online]. 2015, 07/20/2015 [cit. 2017-12-21]. Dostupné z: https://www.electronicproducts.com/Passive_Components/Circuit_Protection/Get_what_you_need_for_LED_driver_protection.aspx?terms=eaton
 - [27] *Understanding LED Drivers* [online]. 1000Bulbs.com, 2014 [cit. 2017-12-23]. Dostupné z: <https://www.1000bulbs.com/pdf/understanding-led-drivers.pdf>
 - [28] *Thermal Management Guide* [online]. Seoul, Korea: SEOUL SEMICONDUCTOR CO., 2005 [cit. 2017-12-23]. Dostupné z: http://mikrokontroler.pl/wp-content/uploads/pliki/Thermal_1.pdf
 - [29] *Thermal Management of Cree® XLamp® LEDs* [online]. Durnham: Cree., ©2016 [cit. 2017-12-27]. Dostupné z: <http://www.cree.com/led-components/media/documents/XLampThermalManagement.pdf>
 - [30] KOTLÍK, Václav. Heat Pipe: princip a konstrukce. *Svět Hardware* [online]. 2007, 1.2.2007 [cit. 2017-12-28]. Dostupné z: <https://www.svethardware.cz/heat-pipe-princip-a-konstrukce/15941>
 - [31] LIAO, Alice. LEDs: Understanding Optical Performance. *Architectural Lighting Technology* [online]. 2014, October 13, 2014 [cit. 2017-12-28]. Dostupné z: http://www.archlighting.com/technology/leds-understanding-optical-performance_o
 - [32] *How to Reduce Glare for Comfortable Lighting Levels* [online]. brightgreen [cit. 2018-01-02]. Dostupné z: <https://cdn.brightgreen.com/files/general/How-to-Reduce-Glare-for-Comfortable-Lighting-Levels-0.pdf>
 - [33] HIRSH, Donald. *Light Management Films in LED-based Luminaire Design* [online]. Morrisville: Bright View Technologies, 2009 [cit. 2018-01-02]. Dostupné z: <https://www.slideshare.net/dghirsh/light-management-films-in-led-luminaire-design>
 - [34] BOYCE, P. R. *Human factors in lighting*. Third edition. Boca Raton, [2014]. ISBN 978-1-4398-7488-2.
 - [35] Circadian Rhythms. *National Institute of General Medical Sciences* [online]. The National Institute of General Medical Sciences, 2017, August 2017 [cit. 2018-01-05]. Dostupné z: https://www.nigms.nih.gov/education/pages/Factsheet_CircadianRhythms.aspx
 - [36] CIRCADIAN RHYTHMS – HOW SLEEP WORKS. *HowSleep Works*[online]. ©2018 [cit. 2018-01-06]. Dostupné z: https://www.howsleepworks.com/how_circadian.html
 - [37] Přes polovinu energie protopíme. *Český Statistický Úřad*[online]. Český Statistický Úřad, 2017, 23. února 2017 [cit. 2018-01-18]. Dostupné z: <https://www.czso.cz/csu/czso/pres-polovinu-energie-protopime>

- [38] ELDEEN HAMZA, Safaa Alaa. *The use of Pulse Width Modulation "PWM" Technique in LED Lighting Systems* [online]. Sudan-Khartoum: El-Neelain University, 2014 [cit. 2018-01-18]. Dostupné z: <https://www.ijsr.net/archive/v3i11/T0NUMTQxMTYx.pdf>
- [39] VÍTEK, Marcel. *Pracovní třídy zesilovačů* [online]. 2016 [cit. 2018-01-22]. Dostupné z: <http://docplayer.cz/16347661-Pracovni-tridy-zesilovacu.html>
- [40] BOLDT, Evan. Pulse Width Modulation with analogWrite. *Robotic Controls* [online]. 2013, 2013-04-01 [cit. 2018-01-25]. Dostupné z: <http://robotic-controls.com/learn/arduino/pulse-width-modulation-analogwrite>
- [41] *LED Current Regulators* [online]. Milpitas [cit. 2018-02-01]. Dostupné z: <http://www.issi.com/WW/pdf/whitepapers/Constant-Current-Regulators.pdf>
- [42] Khanh, T. Q., Bodrogi, P., Vinh, Q. T., & Winkler, H. (2014). LED lighting: Technology and perception. *LED lighting: Technology and perception* (pp. 1-492), DOI: 10.1002/9783527670147
- [43] IRM-45-48ST Mean Well Miniaturní zdroj s terminal 45W 48V. *Mean Well* [online]. Domašov u Brna [cit. 2018-03-06]. Dostupné z: <https://www.czech-meanwell.cz/meanwell/IRM-45-48ST-Mean-Well-Miniaturni-zdroj-s-terminal-45W-48V-d4838.htm>
- [44] Infineon: ILD6150 - Advanced Thermal Protection for High Power LEDs with 60V LED Driver IC ILD6150, Datasheet PDF, pp. 1-24; Rev 2.2; 3/15, Infineon Technologies AG, Germany.
- [45] *Middle Power LED Series 5630: LM561B Plus* [online]. Samsung Electronics Co., 2018 [cit. 2018-03-23]. Dostupné z: https://cdn.samsung.com/led/file/resource/2018/04/Data_Sheet_LM561B_Plus_CRI80_Rev.8.2.pdf